

UBCAK

18.

**ULUSLARARASI
BİLİMSEL ÇALIŞMALAR KONGRESİ**
INTERNATIONAL ACADEMIC STUDIES CONFERENCE

**TAM METİN KİTABI
FULL TEXT BOOK**

**21-22
MAYIS
2026**

www.ubcakcongress.org

18. Uluslararası Bilimsel Çalışmalar Kongresi (UBCAK)

(21 – 22 Mayıs 2026)

(UBCAK)

Tam Metin Kitabı

Yayın Tarihi: 17.06.2026

Editörler / Editors

Abdullah Muhsin YILMAZÇOBAN

Asos Yayınevi

1.baskı

Adres: Çaydağır Mah. Hacı Ömer Bilginoğlu Cad. No: 67/2-4/MERKEZ/ELAZIĞ

Telefon: [0532 643 75 23](tel:05326437523)

Mail Adresi: asos@asosyayinlari.com

Web: www.asosyayinlari.com

[Instagram: https://www.instagram.com/asosyayinevi/](https://www.instagram.com/asosyayinevi/)

[Facebook: https://www.facebook.com/asosyayinevi/](https://www.facebook.com/asosyayinevi/)

[Twitter: https://twitter.com/Asosyayinevi](https://twitter.com/Asosyayinevi)

978-625-8545-51-7

KONGRE BAŞKANI

Doç. Dr. A. Muhsin YILMAZÇOBAN, Gümüşhane Üniversitesi

DÜZENLEME KURULU

Prof. Dr. Süleyman Doğan, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Sosyoloji Bölümü Öğretim Üyesi

Prof. Dr. Ali Seyyar, Sakarya Üniversitesi Emekli Öğretim Üyesi, Siyasal Bilgiler Fakültesi, Çalışma Ekonomisi Bölümü, Sosyal Siyaset Uzmanı

Doç. Dr. Orhan Albayrak, Bezmiâlem Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Fakültesi, Sağlık Yönetimi Bölümü

Doç. Dr. Mahir MAK, Sakarya Üniversitesi

Doç. Dr. Neva DOĞAN, Gümüşhane Üniversitesi, İletişim Fakültesi

Dr. Öğr. Üyesi Gülen SÖNMEZ, Gümüşhane Üniversitesi, İletişim Fakültesi

Dr. İsmail DEMİRAL, Gümüşhane Üniversitesi, İlahiyat Fakültesi,

Dr. Öğr. Üyesi Esra DUDU KARAMAN, Gümüşhane Üniversitesi, İletişim Fakültesi

Dr. Mehmet Akif Günay, Gümüşhane Üniversitesi, İletişim Fakültesi, Halkla İlişkiler ve Tanıtım Bölümü Öğretim Üyesi

Dr. Fatmagül Saklavcı, Kayseri Üniversitesi, Develi İlahiyat Fakültesi, Türk İslam Sanatları Tarihi Bölümü

BİLİM KURULU

Prof. Dr. Zaleha ISMAIL (UniversitiTeknologi Malaysia)

Prof. Dr. Akbar Valadbigi Elmi-Karbordi University, Sanandaj, Iran

Prof. Dr. Seokhee Cho St. John's University

Prof. Dr. Nizami CEFEROV (Azerbaycan)

Prof. Dr. Blagovesta IVANOVA (Bulgaristan)

Prof. Dr. Nurşat JUMADİLOVA (Kazakistan)

Prof. Dr. Dosay KENJETAY (Kazakistan)

Prof. Dr. Arshi KHAN (Hindistan)

Prof. Dr. Dimitri KİTSİKİS (Yunanistan)

Prof. Dr. Sertan Demir (Sakarya Üniversitesi)

Prof. Dr. Rüştü Güntürkün Selçuk Üniversitesi,

Prof. Dr. Hakan Tekedere Gazi Üniversitesi,

Prof. Dr. Süleyman Doğan, Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Ali Seyyar, Sakarya Üniversitesi

Doç. Dr. Orhan Albayrak, Bezmiâlem Üniversitesi

Doç. Dr. Mustafa Tosun Kütahya Dumlupınar Üniversitesi,

Doç. Dr. Ömer Kasım Kütahya Dumlupınar Üniversitesi,

Doç. Dr. Abdullatif Kaban Atatürk Üniversitesi

Doç. Dr. Deniz Güneş (İ.T.Ü)

Doç. Dr. Aşkın Çelik (Manisa Celal Bayar Üniversitesi)

Dr. Deniz Köktan (Sakarya Üniversitesi)

Doç. Dr. Hakan TEKEDERE (Gazi üniversitesi)

Doç. Dr. Seniha Selcen BABAOĞLU AYDAŞ (Gazi üniversitesi)

Doç.Dr. Aşkın ÇELİK (Manisa Celal Bayar Üniversitesi)

Doç. Dr. Kutup Ata TUNCER, (Manisa Celal Bayar Üniversitesi)

Doç. Dr. Abdulmenaf Korkutata (Çanakakle Onsekiz Mart Üniversitesi)

Doç. Dr. Zuhal Akyürek, (Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi)

Doç. Dr. İbrahim Yılmaz (İstanbul Rumeli Üniversitesi)

Doç. Dr. Numan Karaarslan (İstanbul Medeniyet Üniversitesi)

Doç. Dr. Duygu Yaşar Şirin (Namık Kemal Üniversitesi)

Doç. Dr. Ülkün Ünlü Ünsal (T.C. Sağlık Bakanlığı Manisa Şehir Hastanesi)

Doç. Dr. Necati Kaplan (İstanbul Rumeli Üniversitesi)

Doç. Dr. Gaye Özgür Çakal, (Ankara Üniversitesi)

Doç. Dr. Deniz Türkmen (Hacettepe Üniversitesi)

Doç. Dr. Nilay Bereli (Hacettepe Üniversitesi)

Doç. Dr. Şebnem SOYGÜDER BATURLAR (Ege Üniversitesi)

Doç. Dr. Nesrin TAN AKBULUT (Galatasaray Üniversitesi)

Doç. Dr. Nebahat AKGÜN ÇOMAK (Galatasaray Üniversitesi)

Doç. Dr. Galip SAYILOV (Azerbaycan Milli İlimler Akademisi)

Doç. Dr. Afaq MEMMEDOVA (Bakü Devlet Üniversitesi)

Doç. Dr. Zuhal AKMEŞE (Dicle Üniversitesi)

Doç. Dr. Özgür ALTINDAĞ (Dicle Üniversitesi)

Doç. Dr. Müsemma Alagöz KARABEL(Dicle Üniversitesi)

Doç. Dr. Serkan Arslan (Dicle Üniversitesi)

Doç. Dr. Erol Başuyuş(Dicle Üniversitesi)

Doç. Dr. Seher Tetik Işık

Doç.Dr. Mehmet Sait İçen(Dicle Üniversitesi)

Dr. Öğr. Üyesi Nevzat Gönder , (Gaziantep İslam Bilim ve Teknoloji Üniversitesi Tıp Fakültesi)

Dr. Öğr. Üyesi Gökalp Güzel, (Gaziantep İslam Bilim ve Teknoloji Üniversitesi Tıp Fakültesi)

Dr. Öğr. Üyesi Leyla Çimen , (Gaziantep İslam Bilim ve Teknoloji Üniversitesi Tıp Fakültesi)

Dr. Öğr. Üyesi Rukiye Çiftçi , (Gaziantep İslam Bilim ve Teknoloji Üniversitesi tıp Fakültesi)

Dr.Öğr. Üyesi Lale TÜRKMEN (Gazi üniversitesi)

Dr.Öğr. Üyesi Aydın KIVANÇ (Gümüşhane Üniversitesi)

Dr.Öğr. Üyesi Ceren OKTAR (Gazi üniversitesi)

Dr.Öğr. Üyesi Can DOĞAN (Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi)

Dr.Öğr. Üyesi Seçil SOYTOK NALÇACI (Manisa Celal Bayar üniversitesi)

Dr. Öğr. Üyesi Ceren Oktar, Gazi Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Zeynep Tutumlu, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

Dr. Öğr .Üyesi Alp Yürüm, Sabancı Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi İlkay NİŞANCI (İstanbul Üniversitesi)

Dr. Öğr. Üyesi Perihan TAŞ ÖZ (İstanbul Kültür Üniversitesi)

Dr. Öğr. Üyesi Cem YILDIRIM (İstanbul Ayvansaray Üniversitesi)

Dr. Gollar Troïan Aix-Marseille University -Marseille, FRANCE

Dr. Haleh Parsa University of Malaya, Kuala Lumpur, Malaysia

Dr. Mustafa Azizoğlu

Dr. İbrahim Aydın, MEB

Dr. Mehmet Akif Günay, Gümüşhane Üniversitesi

Dr. Fatmagül Saklavcı, Kayseri Üniversitesi

salon1 (1. Gün - 1. Oturum)

Oturum Başkanı		Oturum Başkan Yrd.
Dr. Özge Can		
Sıra	Yazar Bilgisi	Bildiri Bilgileri
9:00	İrem Esin Meral - Doç. Dr. Özge Can	Yeşil Aklama, Örgütsel Bağlılık ve Otantik Kurumsal Sosyal Sorumluluk Algısı
9:15	Nisanur Ak - Doç.Dr. Turgut Türkdoğan	Kripto Para: Yatırımcılık mı, Karanlık Kişilik Mi' (1)
9:30	Doç.Dr. Bora Başaran	Saatlerin ve Sınıfların Ötesinde: Yapay Zekâ, Robotik Otomasyon ve Çalışma ile Eğitimin Yeniden Yapılandırılması
9:45	Doç.Dr. Bora Başaran	Yapay Zekâ Çağında Yabancı Dil Eğitimi İçin Öğretmen Yeterliklerini Yeniden Düşünmek: Kuramsal Bir Çerçeve
10:00	Dr. Nuray Özge Sağbaş	Eğitim ve Sağlık Arakesitinde Okul Sağlığı Hemşireliği: Mevzuat ve Alanyazın Temelli Bir Doküman Analizi
10:15	Soru, cevap ve tartışma	

salon 2 (1. Gün - 1. Oturum)

Oturum Başkanı		Oturum Başkan Yrd.
Dr. Ali Taner		
Sıra	Yazar Bilgisi	Bildiri Bilgileri
9:00	Arş.Gör.Dr. Ali Taner	Kalkınma Gazeteciliğinin Teorik Temelleri ve Modern Medya Ekosistemindeki İşlevi
9:15	Arş.Gör.Dr. Ali Taner	Instagram'ın "Fenomen" Gazetecileri: Profesyonel Olmayan Aktörlerin Haber Üretim Süreçleri
9:30	Ömer Faruk Kuştoğan	Nuri Bilge Ceylan Sinemasında Aidiyet Kavramı Ahlat Ağacı Film Örneği
9:45	Kübra Yıldırım	Türkiye'de Kütüphanelerin Sosyal Medya Kullanımına Yönelik Akademik Çalışmaların İçerik Analizi (2015–2025)
10:00	Doç.Dr. Tutku Eker İşcioğlu	Gerçekten Kim Çevre Dostu Tüketim Yapıyor' Sürdürülebilir Tüketici Profillerinin Farklı Yüzleri
10:15	Soru, cevap ve tartışma	

salon 3 (1. Gün - 1. Oturum)

Oturum Başkanı		Oturum Başkan Yrd.
Prof.Dr. Çiğdem Akman		
Sıra	Yazar Bilgisi	Bildiri Bilgileri
9:00	Prof.Dr. Çiğdem Akman - Araştırmacı Rumeysa Ünlü - Araştırmacı Rüveyde Çolak	Süleyman Demirel Üniversitesinde Yabancı Öğrencilerin Uyum Sorunları ve Çözüm Önerileri
9:15	Dr. Mine Başta	Askeri İletişim Uzmanı ve Ülke İmajının Pekiştireci Olarak Kahraman Fareler
9:30	Prof.Dr. Çiğdem Akman - Araştırmacı Helin Ateş	Sakin Şehirler Gerçekten Sakin Mi' Seferihisar Örneği
9:45	Araştırmacı Murat Barın - Doç.Dr. V. Aytekin Sanalan - Arş.Gör.Dr. Hamza Fatih Sapanca	Dijital Çağda Güvenli İnternet Kullanımı: Bilgi Güvenliği Farkındalığı ve Öz-Yeterlilik İlişkisi
10:00	Soru, cevap ve tartışma	

salon 4 (1. Gün - 1. Oturum)

Oturum Başkanı		Oturum Başkan Yrd.
Uzman Ayhan Yağcı		
Sıra	Yazar Bilgisi	Bildiri Bilgileri
9:00	Uzman Ayhan Yağcı - Uzman Muhammed Taha Sırma	Investigation of Vortex Generator Effects On Interior Aeroacoustic Noise in the A-Pillar and Side Mirror Region of a Passenger Car
9:15	Uzman misra Nur Özcan - Uzman Gökçe Özyapı	Otomotiv Dış Trim Uygulamalarında Logo Üretim Teknolojileri: Dekorasyon Yöntemleri ve Araç Seviyesi Doğrulama Süreçleri
9:30	Uzman Umut Akgün - Uzman Görkem Öztaş	Otomotivde Termal Yönetim ve Aerodinamik Performansta Hava Yönlendirici Bileşenlerin Rolü
9:45	Uzman Mümin Bahar - Uzman Ahmet Sucu - Uzman Gökçe Özyapı	2k/3k Enjeksiyon Teknolojilerinde Tasarım ve Proses Yaklaşımları ile Otomotiv Dış Trim Parçalarına Sağladığı Avantajlar
10:00	Uzman Mümin Bahar - Uzman Gökçe Özyapı	Estetik Plastik Parçalarda Görsel Kalite Hataları ve Tasarım Parametrelerinin Etkisi
10:15	Soru, cevap ve tartışma	

salon1 (1. Gün - 2. Oturum)

Oturum Başkanı		Oturum Başkan Yrd.
Doç.Dr. Seçil Gürün Karatepe		
Sıra	Yazar Bilgisi	Bildiri Bilgileri
10:30	Dr. Gökçe Topçu Onar - Doç.Dr. Seçil Gürün Karatepe	İş-Yaşam Dengesi ve Örgütsel İklim Arasındaki İlişkinin Nitel Bulgular Üzerinden Değerlendirilmesi
10:45	Araştırmacı Tuğba Vamin	Cumhuriyet Dönemi Antik Roma'sında Kadınların Statüsü
11:00	Dr. Aynur Asgarova Pınar	İran'da Muhalif Bir Ses: Molla Nasreddin'in Tebriz Serüveni
11:15	Dr. Hakan Kılıcı	Tedarik Zinciri Yönetiminde Radyo Frekanslı Tanımlama Sistemlerinin Kullanımı
11:30	Mojtaba Abdollahzadeh - Dr. Öğretim Üyesi Volkan	Fizik Eğitiminde Güncel Dijital Teknolojilerin Kullanımı Üzerine Makalelerin İçerik Analizi
11:45	Soru, cevap ve tartışma	

salon 2 (1. Gün - 2. Oturum)

Oturum Başkanı		Oturum Başkan Yrd.
Doç.Dr. Sibel Kundakçı		
Sıra	Yazar Bilgisi	Bildiri Bilgileri
10:30	Doç.Dr. Sibel Kundakçı - Araştırmacı Kutsal Yılmaz	Şer'iyye Sicilleri Işığında Tosya'nın Sosyo-Ekonomik Yapısı ve Tarihi Gelişimi (1721-1722)
10:45	Tuğba Kırkpınar	Finansal Piyasalarda Güvenli Limana Kaçış Eğiliminin Analizi: Türkiye Örneği
11:00	Sabahat Demirci	Önleme ve İstihbari Amaçlı İletişimin Denetlenmesi, Koşulları ve Elde Edilen Verilerin Suçların Soruşturması ve Kovuşturulmasında Kullanılması Sorunu
11:15	Doç.Dr. Zuhal Çiçek	Belirsizlik Çağında Uzatılmış Gençlik: Üniversite Öğrencilerinde İşsizlik ve Gelecek Kaygısı Üzerine Nitel Bir Araştırma
11:30	Dr. Öğretim Üyesi Selda Özkılbaç	Sürdürülebilir Kalkınma ve Çevre
11:45	Soru, cevap ve tartışma	

salon 3 (1. Gün - 2. Oturum)

Oturum Başkanı		Oturum Başkan Yrd.
Doç.Dr. Uğur Tan		
Sıra	Yazar Bilgisi	Bildiri Bilgileri
10:30	Doç.Dr. Uğur Tan - Doç.Dr. Hatice Kübra Gören	Kuraklık Stresinin Tıbbi Bitkilerde Oluşturduğu Etkiler ve Savunma Mekanizmaları
10:45	Dr. Öğretim Üyesi Hüseyin Yanık	Çok Parametrelili Mı Görüntülerinde Derin Öğrenme Tabanlı Otomatik Beyin Tümörü Tespiti ve Segmentasyonu
11:00	Ender Kumral	Araç Aydınlatma İçin Opto-Elektronik Güncel Teknolojiler
11:15	Yaren Bugay - Zehra Çakıroğlu - Hatice Tektaş - Prof.Dr. Belma Hasdemir	Bazı Kiral Asit Hidrazit Türevlerinin Sentezi ve Karakterizasyonu
11:30	Uzman Burak Barışkan	Automated Generation of Engineering Revision Comparison Reports Using Robotic Process Automation in Plm Environments
11:45	Soru, cevap ve tartışma	

salon 4 (1. Gün - 2. Oturum)

Oturum Başkanı		Oturum Başkan Yrd.
Dr. Meltem Süpürtülü		
Sıra	Yazar Bilgisi	Bildiri Bilgileri
10:30	Gürkan Ertuğral - Dr. Meltem Süpürtülü	Standard Diagnostic Tools in the Automotive Industry
10:45	Serkan Demir	Otomotiv Sektöründe Çevrimiçi Satış Modelinin Elektrik-Elektronik Sistem Fonksiyonlarına Etkisi: Ota, Uzaktan Teşhis ve Siber Güvenlik Perspektifi
11:00	Abdumecit Aydın	Emea ve Nafta Çarpışma Testi Gerekliliklerinin Karşılaştırılması ve Araç Gövdesi (Bıw) Tasarımına Etkileri
11:15	Dr. Meltem Süpürtülü - Prof.Dr. Ersen Yılmaz	Kurşun-Asit Akülerde Derin Öğrenme Tabanlı Performans Değerlendirmesi
11:30	Uzman Furkan Mahir Taşatan - Uzman Gürhan Altınel	Kaynak Geometrisinin ve Proses Değişkenliğinin Bir Prototip Amortisörün Dayanıklılık Performansı Üzerindeki Etkisi
11:45	Soru, cevap ve tartışma	

salon1 (1. Gün - 3. Oturum)

Oturum Başkanı		Oturum Başkan Yrd.
Dr. Sinan Bilici		
Sıra	Yazar Bilgisi	Bildiri Bilgileri
12:00	Dr. Sinan Bilici	Lise Öğrencilerinde Akıllı Telefon Bağımlılığı Düzeylerinin Çeşitli Değişkenler Açısından İncelenmesi
12:15	Dr. Sinan Bilici	Ergenlerde Kısa Video Bağımlılığı ve Beyin Çürümesi Arasındaki İlişkinin İncelenmesi
12:30	Zehra Gülen Turan - Doç.Dr. Ayça Tufan Baknalı	Günümüz Türk Sanatında Kitsch'in Görünümleri: Reflektif Kullanım İle Yüzeysel Estetik Arasında
12:45	Dr. Asiye Sezgin Tüylü	Tanzimat Fermanını Hazırlayan Bir Metin: Avrupa Ahvaline Dair Risale
13:00	Dr. Öğretim Üyesi Selda Özkılbaç	Finansal Farkındalık ve İktisadi Büyüme İlişkisi
13:15	Soru, cevap ve tartışma	

salon 2 (1. Gün - 3. Oturum)

Oturum Başkanı		Oturum Başkan Yrd.
Doç.Dr. Kamil Doğanç		
Sıra	Yazar Bilgisi	Bildiri Bilgileri
12:00	Doç.Dr. Kamil Doğanç	Mezopotamya Hukukunda Kadının Yeri: Sümer, Babil ve Assur Kanunları Üzerine Bir Değerlendirme
12:15	Hamide Tetik - Arş.Gör.Dr. Çiğdem Yalçın	Yabancı Dil Olarak Türkçe Öğretiminde Dijital Araç Kullanımına İlişkin Lisansüstü Tezlerin Sistematiik İncelenmesi
12:30	Araştırmacı Cemile Büşra Keseli - Dr. Öğretim Üyesi Esra Akgöl	Resimli Çocuk Kitaplarının "çok Kültürlölük" Bağlamında İncelenmesi: Sistematiik Derleme Çalışması
12:45	Cansel Ece Can	Beden Eğitimi Öğretmenlerinin Sosyal Medya Kullanımı: Bir Meta-Sentez Çalışması
13:00	Ayşe Nilüfer Yılmaz Atay	Televizyon Yayıncılığında İçerik Denetimi ve Etik İhlaller: Türkiye Örneğinde Bir Değerlendirme
13:15	Soru, cevap ve tartışma	

salon 3 (1. Gün - 3. Oturum)

Oturum Başkanı		Oturum Başkan Yrd.
Doç.Dr. Ramazan Demircioğlu		
Sıra	Yazar Bilgisi	Bildiri Bilgileri
12:00	Doç.Dr. Ramazan Demircioğlu	Aktaş (Niğde-Orta Anadolu) Yöresine Ait Tektonik Hatların Uydu-Tabanlı Değerlendirilmesi
12:15	Barış Uluçay - Berkay Cedetaş	Orijinal Ekipman Üreticisi (Oem) Araçlarda Lastik Kaynaklı Kalite Algısı Üzerine Yol Yüzeylerinin ve Test Koşullarının Etkisi: Parça ve Yonga Aşınma Mekanizması Üzerine Bir Çalışma
12:30	Dr. Birtan Güler	Kolon Tip Elektrik Destekli Direksiyon (C-Eps) Sistemlerinin Analizi
12:45	Furkan Cengizoğlu	Gizli Aydınlatma Sistemleri
13:00	Murat Akdoğan	Üç Tekerlekli Araçlarda Direksiyon Çatalı Tasarımlarının Yapısal Performansı
13:15	Soru, cevap ve tartışma	

salon 4 (1. Gün - 3. Oturum)

Oturum Başkanı		Oturum Başkan Yrd.
Dr. Öğretim Üyesi Burak Aktekelı		
Sıra	Yazar Bilgisi	Bildiri Bilgileri
12:00	Dr. Öğretim Üyesi Burak Aktekelı - Dr. Buğra Şensoy	Şebeke Entegrasyonu Açısından Hibrit Enerji Santrallerinin Stratejik Rolü
12:15	Mehmet Sinan Alak - Prof.Dr. Pınar Öztıpçu-Vatan	Yeni Sentezlenen 4-Oh-3,5bis(Cf3) Akrilonitril Türevinin İnsan Meme Karsinomu (Mcf-7) Üzerindeki Çoğalmayı Baskılayıcı Etkisinin Araştırılması
12:30	Doç.Dr. Nurcan Berber	Furan-Piridin-Pirimidin Halkalarını İçeren Hibrit Bileşiğın Sentezi
12:45	Öğr.Gör. Şeyma Hümeıra Çakır - Araştırmacı İbrahim Canbey	Zeytin Yaprığının Fitokimyasal Kompozisyonu, Ekstraksiyon Metotları, Biyolojik Aktiviteleri ve Yenilikçi Uygulamaları
13:00	Mehmet Berhan Bay - Dr. Meltem Supurtulu	A Brief Review of Ota-Based Vehicle Developments in the Automotive
13:15	Soru, cevap ve tartışma	

salon1 (1. Gün - 4. Oturum)

Oturum Başkanı		Oturum Başkan Yrd.
Doç.Dr. İlknur Yazıcılar Özçelik		
Sıra	Yazar Bilgisi	Bildiri Bilgileri
13:30	Reyhan Alaçam - Kevser Ceren Çoşkun - Doç.Dr. İlknur Yazıcılar Özçelik	Beden Eğitimi Öğretmen Adayları ile Diğer Branş Öğretmen Adaylarının Akademik Motivasyon ve Motivasyonel Çalışma Koşullarının İncelenmesi
13:45	Doç.Dr. Yahya Hiçyılmaz - Haluk Toker	Okul Öncesi Öğretmenlerin Sanat Eğitimi Hakkındaki Görüşleri
14:00	Doç.Dr. Deniz Kundakçı - Araştırmacı Serdar Sena Yetgin	Avrupa Birliği Ekseninde Kamu Yönetimi Reformları: Portekiz ve Türkiye Üzerine Karşılaştırmalı Bir Analiz
14:15	Doç.Dr. İsmail Bülbül	346 Numaralı Teşrifat Defterine Göre Kırım Hanlarına Uygulanan Teşrifat
14:30	Doç.Dr. Deniz Kundakçı - Araştırmacı Hilal Bayar	Popülist Siyaset: Donald Trump'ın Siyaset Anlayışına İlişkin Bir Söylem Analizi
14:45	Soru, cevap ve tartışma	

salon 2 (1. Gün - 4. Oturum)

Oturum Başkanı		Oturum Başkan Yrd.
Doç.Dr. Gülsüm Hekimoğlu		
Sıra	Yazar Bilgisi	Bildiri Bilgileri
13:30	Doç.Dr. Gülsüm Hekimoğlu	Modern Türkiye’de Damak Tadının Sosyolojisi: Yemek Pratikleri ve Kültürel Ayrım
13:45	Ebrar Çoban	Modern Arap Romanında Yönetici Profili
14:00	Araştırmacı Ahmet Yavuz - Prof.Dr. Osman Yılmaz Kartal	Aydınlanma ve Yenilenme Perspektifinden Öğrenen Şehir Dönüşümü ve Eğitim Felsefesi İnşası: Çanakkale Özelinde Bir Durum Çalışması
14:15	Araştırmacı Ebrar Cevheri	Türk Tangosunun Doğuşu ve Günümüz Temsilcileri
14:30	Dr. Öğretim Üyesi Muhammet Karanfil - Eda Çağlar	Türkiye’nin Fındık İhracatının Dış Ticaretteki Rekabet Gücünün Değerlendirilmesi
14:45	Soru, cevap ve tartışma	

salon 3 (1. Gün - 4. Oturum)

Oturum Başkanı		Oturum Başkan Yrd.
Dr. Zafer Güler		
Sıra	Yazar Bilgisi	Bildiri Bilgileri
13:30	Onur Onarlar - Murat Akdoğan - İbrahim İnan - Dr. Zafer Güler	Mikromobilite Araçlarının Arka Süspansiyonu İçin Salıncak Kolu Konsept Tasarım Çalışması.
13:45	Atahan Gen - Beyzanur Erdem	Otomotiv Sac Parçalarında Geometrik Tasarımın Çarpışma Performansına Etkisinin İncelenmesi
14:00	Tahsin Batuhan Yılmaz	B1w Yapılarında Alüminyum Kullanımı: Önemi, Avantajları, Zorlukları ve 2000'lerden Günümüze Evrimi
14:15	Enes Cebe - Mücella Gümüş İmren	Araç Motor Bölmelerinde Akü Tavası Üzerindeki Akü Montaj Tipleri ve Avantajlarının İncelenmesi
14:30	Enes Cebe	Elektrikli Araçlarda Düz Orta Taban Tüneli ve Formlu Gövde Tüneli Stratejilerinin Müşteri Algısı ve İç Mekân Deneyimi Açısından Değerlendirilmesi
14:45	Soru, cevap ve tartışma	

salon 4 (1. Gün - 4. Oturum)

Oturum Başkanı		Oturum Başkan Yrd.
Prof.Dr. Ozan Gürbüz		
Sıra	Yazar Bilgisi	Bildiri Bilgileri
13:30	Araştırmacı İbrahim Canbey - Dr. Öğretim Üyesi Kader Çetin - Doç.Dr. Elif Yıldız - Prof.Dr. Ozan Gürbüz	Zeytinyağındaki Organik Uçucu Bileşikler
13:45	Berkant Ahmet - Sıla Bozen Taşçı	Ağ İletişim Protokollerinin Karşılaştırılması ve Kullanım Alanlarının Belirlenmesi
14:00	Uzman Mehmet Aydın	Effect of Double Hinge Line Application On A-Pillar Trim Safety System Performance
14:15	Hüseyin Oğuz Cıvcık	Ön ve Arka Zemin Halısı Pur Köpük Tanımında Sertlik İyileştirmesi İçin Değişiklik: 332 Proje Örneği
14:30	Furkan Alemdar - Ömer Faruk Yücel	Measurement Strategy Impact On Gap & Flush Correlation in Automotive Industry
14:45	Soru, cevap ve tartışma	

salon1 (1. Gün - 5. Oturum)

Oturum Başkanı		Oturum Başkan Yrd.
Doç.Dr. Hakan Turan		
Sıra	Yazar Bilgisi	Bildiri Bilgileri
15:00	İsmail Doğan - Doç.Dr. Hakan Turan	Oecd Öğrenme Pusulası 2030 Bileşenleri Çerçevesinde Türkiye Yüzyılı Maarif Modeli Psikoloji Öğretim Programının Analizi
15:15	Rabia Yılmaz	Kassam Tugayları Sözcüsü Ebu Ubeyde'nin Demeçlerinde Tenas ve Retorik İnceleme
15:30	Araştırmacı Ayşegül Şahin - Prof.Dr. Makbule Gözde Didiş Kabar	6. Sınıf Matematik Ders Kitabının Matematiksel Modelleme Açısından İncelenmesi
15:45	Araştırmacı Sümeyye Kavutcu - Doç.Dr. Bilge Kınam	21.Yy. Görsel İletişim Tasarımında Frig Kültürünün Göstergebilimsel Çözümlemeleri ve Bir Uygulama Örneği
16:00	Muhammed Nur Kabbani	İyad Kuneybî'nin İnas Adlı Romanının Teknik İncelemesi
16:15	Soru, cevap ve tartışma	

salon 2 (1. Gün - 5. Oturum)

Oturum Başkanı		Oturum Başkan Yrd.
Doç.Dr. Tutku Eker İşcioğlu		
Sıra	Yazar Bilgisi	Bildiri Bilgileri
15:00	Doç.Dr. Tutku Eker İşcioğlu - İpek Güler	Çevreci Ama Fiyata Duyarlı: Sürdürülebilir Giyim Tüketiminde Tutum–davranış Açığı
15:15	Dr. Öğretim Üyesi Muhammet Karanfil - Hong Shu	Çin’in Tam Elektrikli Araç İhracatındaki Dış Ticaret Rekabet Gücünün Değerlendirilmesi
15:30	Zekiye Tan	Beğavi’nin Meâlimü’t- Tenzil Adlı Tefsirinde En’âm Sûresinde Geçen Abdullah B. Muğaffel Rivayetleri Üzerine Bir İnceleme
15:45	Ferit Özkaya - Dr. Öğretim Üyesi Özlem Tokgöz	Sınıf Öğretmenlerinin Matematik Ders Kitabı Etkinlikleri Hakkındaki Görüşleri: Birinci Sınıf Örneği
16:00	Kenfack Tsueti Joseph Valdaıs	Ab Ülkelerinin İhracat Performansının Rca Açısından İncelenmesi
16:15	Soru, cevap ve tartışma	

salon 3 (1. Gün - 5. Oturum)

Oturum Başkanı		Oturum Başkan Yrd.
Uzman Ahmet Sucu		
Sıra	Yazar Bilgisi	Bildiri Bilgileri
15:00	Uzman Ahmet Sucu	Akustik İsteri Olan Otomotiv Plastik Parçalarının Testleri ve Test Yöntemleri
15:15	Ferhat Can Köse - Necdet Selim Koçyiğit - Yağız Selçuk	Otomotiv Gövde Yapılarında Kullanılan Çok Katmanlı Kaplama Sistemlerinin Yapısal Özellikleri ve Korozyon Koruma Performansının Değerlendirilmesi
15:30	Ferhat Can Köse - Necdet Selim Koçyiğit - Yağız Selçuk	Otomotiv a Sütunu Yapılarında Montaj Kalitesinin İyileştirilmesi İçin Datum Stratejisi ve Tolerans Zinciri Analizi
15:45	Ferhat Can Köse - Yağız Selçuk - Necdet Selim Koçyiğit	Otomotiv Uygulamalarında Gelişmiş Yüksek Mukavemetli Çelikler İçin Tasarım Kısıtları ve Üretilebilirlik Değerlendirmesi
16:00	Necdet Selim Koçyiğit - Yağız Selçuk - Ferhat Can Köse	Yapısal Macunların Araç Gövde Performansı Üzerindeki Etkisi
16:15	Soru, cevap ve tartışma	

salon 4 (1. Gün - 5. Oturum)

Oturum Başkanı		Oturum Başkan Yrd.
Prof.Dr. Alptekin Kısasöz		
Sıra	Yazar Bilgisi	Bildiri Bilgileri
15:00	Araştırmacı Kübilay Öztürk - Prof.Dr. Alptekin Kısasöz - Doç.Dr. Mustafa Tümer	Welding and Characterization of Inconel 718 and Ph 17-7 Stainless Steel Alloys Via Laser Welding
15:15	Uzman Başar Utaş	Otomotiv Arka Lambalarında Şeffaf Dış Lensler İçin Uv Dayanımı: İç Bileşenlerin Bağımsız Uv Stabilizasyona İhtiyacı
15:30	Hami Güler	Otomotiv Sektöründe Proje Yönetimi Uygulamaları: Süreçler, Yöntemler ve Stratejik Etki
15:45	Sıla Bozen Taşçı - Berkant Ahmet	Araç Elektrik Elektronik Mimarisi ve Haberleşme Ağının Evrimi
16:00	Musa Yılmaz - İsmail Gürbüz	Güvenlik Standartlarının Araç Ee Mimari Entegrasyonu

salon1 (2. Gün - 1. Oturum)

Oturum Başkanı		Oturum Başkan Yrd.
Dr. Öğretim Üyesi Serap Mutlu Yaniç		
Sıra	Yazar Bilgisi	Bildiri Bilgileri
9:00	Dr. Öğretim Üyesi Serap Mutlu Yaniç	Uyarana Duyarlı Akıllı Polimerlerde Kimyasal Mekanizmalar
9:15	Ali Enes Temizkan - Doç.Dr. Mehmet Dal	Endüstriyel Sürücülerde Zamanlayıcı Tabanlı Darbe Yakalama ve Sayaç Tabanlı Kuadratur Kod Çözme Metodolojilerinin Karşılaştırmalı Analizi
9:30	Uzman Onur Kozbay	Investigation of Automotive Fixed Glass Bonding Processes: Comparison of Primered and Primerless Systems
9:45	Hilal Alın	Araçlarda Kullanılan Cam Önü Plastik Parçalar: Fonksiyonel Rolü, Malzeme ve Üretim Süreçlerine Genel Bakış
10:00	Hilal Alın	Otomotiv Camlarının Sürücü ve Yolcu Güvenliğine Etkileri
10:15	Soru, cevap ve tartışma	

salon 2 (2. Gün - 1. Oturum)

Oturum Başkanı		Oturum Başkan Yrd.
Dr. Gamze Çoban		
Sıra	Yazar Bilgisi	Bildiri Bilgileri
9:00	Dr. Gamze Çoban	Sakarya İlinde Arazi Örtüsü Dinamiklerinin Mekânsal Analizi
9:15	Dr. Öğretim Üyesi Şükrü Acar	Yanıt Yüzey Yöntem (Rsm) Tekniğinin Box-Behnken Tasarımı (Bbd) ile Maserasyon Ekstraksiyon Modellemesi Kullanılarak Koyun Yününden Alkalın Hidroliz Yöntemi ile Keratin Eldesi ve Karakterizasyonu: Konya Merinos Yünü Örneği
9:30	Dr. Öğretim Üyesi Şükrü Acar	Yanıt Yüzey Yöntem (Rsm) Tekniğinin Box-Behnken Tasarımı (Bbd) ile Maserasyon Ekstraksiyon Modellemesi Kullanılarak Koyun Yününden Asit Hidroliz Yöntemi ile Keratin Eldesi ve Karakterizasyonu: Konya Merinos Yünü Örneği
9:45	Şahin Keskin	"Lehimleme ile Birleştirilen S235 ve S355 Çeliklerinin Ara Yüzey ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması"
10:00	Meriç Büyükkoyuncu - Gamze Şaşmaz - İbrahim Gökçe - Taner Çelik	Hidrolik Pompa Bağlantı Plakalarında Gerilme Azaltımı ve Yorulma Ömrünün Artırılması İçin Şekil Optimizasyonu Yaklaşımı
10:15	Soru, cevap ve tartışma	

salon 3 (2. Gün - 1. Oturum)

Oturum Başkanı		Oturum Başkan Yrd.
Dr. Sibel Zorlu Öztürk		
Sıra	Yazar Bilgisi	Bildiri Bilgileri
9:00	Dr. Sibel Zorlu Öztürk	Diyabette Kornea Değişiklikleri: Sistemik Mikrovasküler Hasarın Erken Bir Belirteci
9:15	Öğr.Gör. Dr. Keriman Yıldız - Öğr.Gör. Döndü Koyuncuoğlu	Türkiye’de Transisyonel Bakım Modelinin Cerrahi Hastalıkları Hemşireliği Bilim Dalı’ndan Yayınlanan Tezlerde Kullanımının İncelenmesi
9:30	Uzman Sidar Öztürk	Ortopedide Yapay Zeka: Cerrahi Sonuçların Tahmini
9:45	Dr. Zafer Volkan Gökçe	Kemik İyileşmesinde Biyolojik Destekleme: Gerçekten Sonuçları İyileştiriyor Mu'
10:00	Öğr.Gör. Dr. Keriman Yıldız - Öğr.Gör. Döndü Koyuncuoğlu	Yaşlılıkta Yalnız Ölümlere Karşı Erken Uyarı Sağlamada Akıllı Teknolojiler: Olgu Sunumu
10:15	Soru, cevap ve tartışma	

salon1 (2. Gün - 2. Oturum)

Oturum Başkanı		Oturum Başkan Yrd.
Doç.Dr. Seda Göktepe Körpeoğlu		
Sıra	Yazar Bilgisi	Bildiri Bilgileri
10:30	Doç.Dr. Seda Göktepe Körpeoğlu - Araştırmacı Egemen Özkurt	Araç Rotalama Problemlerinde Derin Öğrenme ve Pekiştirmeli Öğrenmenin Bibliyometrik ve Tematik Evrimi
10:45	Uzman Sedat Tarakçı - Dr. Efe Işık	Serbest-serbest Sınır Koşulları Altında Otomotiv Ticari Araç Tahrik Milllerinde Akustik Sönümleyici Performansının Deneysel Olarak Değerlendirilmesi
11:00	Eren Geneci	Blokzincir Teknolojisi ile Nesnelerin İnterneti (Iot) Güvenliğinin Sağlanması
11:15	Araştırmacı Alaeddin Türkmen - Dr. Barış Bayram - Araştırmacı Ahmet Çay	Belge Anlama Sistemlerinde Farklı Ocr Paradigmalarının Karşılaştırılması
11:30	Cansu Hidayet Kelebek	Improve Validation Process With Customer Connectivity Data
11:45	Soru, cevap ve tartışma	

salon 2 (2. Gün - 2. Oturum)

Oturum Başkanı		Oturum Başkan Yrd.
Prof.Dr. Fazilet Nezahat Alayunt		
Sıra	Yazar Bilgisi	Bildiri Bilgileri
10:30	Araştırmacı Nurgül Öngören - Prof.Dr. Fazilet Nezahat Alayunt	Hassas Tarım Uygulamalarında Görüntü İşleme Teknolojileri
10:45	Araştırmacı Mesut Şimşek - Doç.Dr. Osman Hansu - Prof.Dr. Nildem Tayşi	Atık Bims Tozunun Tekli, İkili ve Üçlü Atık Toz Sistemlerinde Kendiliğinden Yerleşen Harçların Taze Hal Özelliklerine Etkisi
11:00	Mesut Çetinkaya - Doç.Dr. Gül Ebru Orhun	Çanakkale İli, Ezine İlçesi Biyokütle Enerji Potansiyelinin İncelenmesi ve Sürdürülebilirlik Açısından Değerlendirilmesi
11:15	Araştırmacı Ahmet Çay - Dr.Araştırmacı Barış Bayram - Araştırmacı Alaeddin Türkmen - Araştırmacı Ayşe Dilara Türkmen	Maliyet-Etkin Jeokodlama Pipeline'ı: Önbellemek Arama, Sokak Aradeğerlemesi ve Makine Öğrenmesi Tabanlı Koordinat Tahmini
11:30	Beyhan Kadir Turgut - Prof.Dr. Mehmet Recep Bozkurt	Lcl Filtreli Aktif Ön Katlı (Afe) Sürücü Sistemlerinde ,sebeke Tarafı Harmonik Analizi
11:45	Soru, cevap ve tartışma	

salon 3 (2. Gün - 2. Oturum)

Oturum Başkanı		Oturum Başkan Yrd.
Dr. Muhammed Furkan Çiftçi		
Sıra	Yazar Bilgisi	Bildiri Bilgileri
10:30	Dr. Muhammed Furkan Çiftçi	Sıgırlarda Opu Öncesi Ablasyonla Uzaklaştırılan Foliküler Yapı Sayısının Takip Eden Folikül Popülasyonu ve Oosit Verimi Üzerine Etkisi
10:45	Doç.Dr. Erhan Kara - Dr. Öğretim Üyesi Serkan Aydın - Melek Demir	Taekwondo Maçlarının Sporcuların Oksijen Satürasyonu ve Kalp Atımı Üzerine Etkileri
11:00	Doç.Dr. Hilal Uysal - Uzman Ayşegül Okyay - Dr. Öğretim Üyesi Elçin Kasapoğlu	Koah ve Astım Hastalarında İnhaler Kullanımının Ağız Sağlığı ve Beslenme Durumu Üzerindeki Etkileri
11:15	Hatice Yaren Levendoğlu - Doç.Dr. Melih Balyan	Beden Eğitimi ve Spor Derslerinde Kullanılan İşbirliğine Dayalı Öğretim Yönteminin Sosyal Beceriler ve Empati Üzerine Etkisi
11:30	Dr. Öğretim Üyesi Elçin Sebahat Kasapoğlu - Uzman Funda Çakır - Doçent Hilal Uysal	Palyatif Bakım İhtiyacı Olan Yoğun Bakım Hastalarının Ailelerinin Bakım Yüğü ve Sosyo-Demografik Faktörlerle İlişkisi
11:45	Soru, cevap ve tartışma	

salon1 (2. Gün - 3. Oturum)

Oturum Başkanı		Oturum Başkan Yrd.
Doç.Dr. Serkan Apay		
Sıra	Yazar Bilgisi	Bildiri Bilgileri
12:00	Tahir Araz - Doç.Dr. Serkan Apay	E195 Hammadesinde Farklı Parametre ve Kaynak Telleri Kullanılarak Yapılan Kaynak İşleminin Mekanik Özelliklere Etkisinin İncelenmesi
12:15	Arş.Gör. Hilmi Abacı - Prof.Dr. Zeliha Selek	Ankara İli Yağış Frekans Analizi
12:30	Araştırmacı Sinan Deveci - Doç.Dr. Meral Akkoyun Kurtlu	Doğal Kauçuk Esaslı Otomotiv Titreşim Önleyici Elemanlarda Vulkanizasyon Davranışının Değerlendirilmesi
12:45	Anıl Şeker - Furkan Değirmencioğlu	Mini Elektrikli Araçlar İçin Ackermann Geometrisine Dayalı Kremayer-pinyon Direksiyon Sisteminin Analitik Ön Tasarımı ve Kinematik Değerlendirmesi
13:00	Zeki Kaya - Doç.Dr. Serkan Apay	Aısı 304 Hammadesinde Farklı Parametre ve Kaynak Telleri Kullanılarak Yapılan Kaynak İşleminin Mekanik Özelliklere Etkisinin İncelenmesi
13:15	Soru, cevap ve tartışma	

salon 2 (2. Gün - 3. Oturum)

Oturum Başkanı		Oturum Başkan Yrd.
Dr. Öğretim Üyesi Murat Akın		
Sıra	Yazar Bilgisi	Bildiri Bilgileri
12:00	Dr. Öğretim Üyesi Murat Akın	Çift Serbestlik Dereceli (2 Dof) Dinamik Durum Geri Beslemesi ile Ayrık Model İzleme Probleminin Doğrusal Matris Eşitsizlikleri Kullanılarak Çözümü
12:15	Dr. Öğretim Üyesi Murat Akın	Tek Serbestlik Dereceli (1 Dof) Dinamik Çıkış Geri Beslemesi ile Zamanda Sürekli Model İzleme Probleminin Doğrusal Matris Eşitsizlikleri Kullanılarak Çözümü
12:30	Dr. Hatice Şeyma Yücel - Prof.Dr. Ahmet Balkaya	Root Architecture Evaluation of Interspecific Tomato Rootstock Candidates
12:45	Mehmet Sevinç - Doç.Dr. Ahmet Şenol	Bitlocker Şifreleme Anahtarlarının Elde Edilmesinde Kullanılan Yöntemlerin Adli Bilişim Kapsamında Değerlendirilmesi
13:00	Özge Sena Yıldız - Doç.Dr. Dilek Yıldız Özkan	Çocukluk Evlerine Dair Epizodik Anılar: Mekânsal Tetikleyicilerin ve Duygusal Yoğunluğun Rolü
13:15	Soru, cevap ve tartışma	

salon 3 (2. Gün - 3. Oturum)

Oturum Başkanı		Oturum Başkan Yrd.
Doç.Dr. Fatma Satılmış		
Sıra	Yazar Bilgisi	Bildiri Bilgileri
12:00	Doç.Dr. Fatma Satılmış	Koyunlarda Gebelik Dönemi İlaç Yönetimi ve Föto-Maternal Etkileşimler
12:15	Uzman Dr. Dilara Yiğit - Doç.Dr. Hüseyin Demirtaş	Revaskülarizasyon Sonrası Periferik Arter Hastalığında Bireyselleştirilmiş Antitrombotik Tedavi Seçimi: Rivaroksaban, Klopidoğrel ve Apiksaban
12:30	Doç.Dr. Kübra Karakaş Alkan	Küçükbaş Hayvanlarda Embriyo Üretim Teknolojilerinin Önemi
12:45	Doç.Dr. Hasan Alkan	Sığırlarda Embriyo Üretim Teknolojileri: Genetik İlerleme ve Sürdürülebilir Hayvancılıktaki Önemi
13:00	Dr. Öğretim Üyesi Osman Çoban - Öğr.Gör. Ayşe Nur Şekeroğlu	Nörolojik Hastalarda Robotik Yürüme Destek Cihazının Algılanan Kullanılabilirliği ve Memnuniyetinin İncelenmesi
13:15	Soru, cevap ve tartışma	

salon1 (2. Gün - 4. Oturum)

Oturum Başkanı		Oturum Başkan Yrd.
Dr. Öğretim Üyesi Ahmet Çağrı Kılınç		
Sıra	Yazar Bilgisi	Bildiri Bilgileri
13:30	Dr. Öğretim Üyesi Ahmet Çağrı Kılınç	Sürekli Lif Takviyeli Kompozitlerin 3b Yazdırılması İçin Bir Hot-End Tasarımı
13:45	İlbey Kale	Otomotiv Koltuk Başlık Tüplerinde Tasarım Parametrelerinin Ultimate Strength Performansına Etkisi: Kalınlık ve Malzeme Mukavemeti Karşılaştırmalı Cae ve Deneysel Analizi
14:00	Mutlu Aksoy	Otomotiv Koltuk Recliner Kolunun Çoklu Yükleme Koşulları Altında Sonlu Elemanlar Analizi
14:15	Yaren Naz Serdaroğlu Taçyıldız - Prof.Dr. Beril Salman Akın	Sınırdaki Karbon Düzenleme Mekanizması (Skdm) Kapsamında Demir-Çelik Sektörünün Değerlendirilmesi: Türkiye İçin Uygulamalı Bir Analiz
14:30	Teslime Özbay - Doç.Dr. Erdoğan Timoçin	Polikarbonat Oftalmik Lenslerin Kesim Sürecinde Oluşan Mikroplastiklerin Tespiti
14:45	Soru, cevap ve tartışma	

salon 2 (2. Gün - 4. Oturum)

Oturum Başkanı		Oturum Başkan Yrd.
Dr. Öğretim Üyesi Wida Simzari		
Sıra	Yazar Bilgisi	Bildiri Bilgileri
13:30	Araştırmacı Berke Korkmaz - Dr. Öğretim Üyesi Wida Simzari	Çocuk ve Ergenlerde Mobil Cihaz Kullanımının Yeme Davranışı ve Beslenme Düzeni İle İlişkisi
13:45	Araştırmacı Betül Özgür - Prof.Dr. Nurettin Abut - Dr. Öğretim Üyesi Necmi Cemal Özdemir	Elektrikli Araçlarda Şarj İstasyonlarının Şebeke Üzerindeki Harmonik Etkisi ve Aktif Filtreler
14:00	Araştırmacı Aylin Yeşildağ - Dr. Öğretim Üyesi Wida Simzari	Çalışan Yetişkinlerde Toplu Beslenme Alanlarında Öğün Tüketimi ile Obezite Arasındaki İlişkinin Değerlendirilmesi
14:15	Dr. Ercan Yılmaz - Prof.Dr. Erdem Topal - Dr. Zeynep Yamancan Yılmaz - Doç.Dr. Emine Çamtosun - Doç.Dr. İsmail Dündar	Konjenital Adrenal Hiperplazili Çocukların Demografik, Atopik ve Tedavi Özellikleri
14:30	Doç.Dr. Uğur Tan - Doç.Dr. Hatice Kübra Gören	Bitki Islahının Amaçları
14:45	Soru, cevap ve tartışma	

salon 3 (2. Gün - 4. Oturum)

Oturum Başkanı		Oturum Başkan Yrd.
Dr. Kübra Arslan		
Sıra	Yazar Bilgisi	Bildiri Bilgileri
13:30	Dr. Kübra Arslan	Pediyatrik İntrakranial Kistik Lezyon Kist Hidatik-Olgı Sunumu
13:45	Dr. Kübra Arslan	Uterin Nadir Bifazik Kitle Adenosarkoma-Olgı Sunumu
14:00	Dr. Kübra Arslan	Tiroide Metastatik Akciğer Adenokarsinomu: İmmünohistokimyasal Bulgular Eşliğinde Bir Olgı
14:15	Çisem Altunayar Ünsalan - Doç.Dr. Özkan Doğanay	Tectoridinin Potansiyel Bir P13kα İnhibitörü Olarak Değerlendirilmesi: Doğal ve Mutant Yapılar Üzerinde Karşılaştırmalı Bir Moleküler Kenetlenme Çalışması
14:30	Arş.Gör. Bilge Eylül Şentürk - Öğr.Gör. Esra Karataş - Prof.Dr. Hatice Yeşim Karasulu	Peri-Implantitis Tedavisinde Foto Kürlenebilir Melatonin Yüklü Hidrojeller: Formülasyon ve Karakterizasyon
14:45	Soru, cevap ve tartışma	

salon1 (2. Gün - 5. Oturum)

Oturum Başkanı		Oturum Başkan Yrd.
Prof.Dr. Osman Altıntaş		
Sıra	Yazar Bilgisi	Bildiri Bilgileri
15:00	Prof.Dr. Osman Altıntaş - Uzman Aslan Bahtiyar	Coefficient Estimates for Certain Subclasses of Analytic Functions
15:15	Araştırmacı Oğuzhan Verim - Prof.Dr. Turgay Partal	Rize ve Akçaabat'ta Maksimum Yağışların Yenilikçi Şen Yöntemleriyle Trend Analizi
15:30	Berat Aslan - Dr. Öğretim Üyesi Muhammet Kurucu	Mamüratilaziz'den Elazığ'a Geçiş Sürecinde Konut Mimarisi ve Sokak Silüetinin Değişimi
15:45	Ahmet Arslan - Prof.Dr. İsmail Bozkurt	Güneydoğu Anadolu'da (Adıyaman Bölgesi) Petrol Kuyularının Jeotermal Enerjiye Dönüştürülmesi: Terk Edilmiş Sahalar İçin Bir Değerlendirme
16:00	Gizemnur Kışla - Dr. İlknur Yılmaz - Prof.Dr. Tülin Özbek	Genomik Mühendisliği Yaklaşımıyla Bakteriyel Büyümeye Bakış
16:15	Soru, cevap ve tartışma	

salon 3 (2. Gün - 5. Oturum)

Oturum Başkanı		Oturum Başkan Yrd.
Doç.Dr. Zeynep Başağaoğlu Demirekin		
Sıra	Yazar Bilgisi	Bildiri Bilgileri
15:00	Arş.Gör. Büşra Nur Keleş - Doç.Dr. Zeynep Başağaoğlu Demirekin	Protetik Diş Tedavisinde Yapay Zeka Uygulamaları: Güncel Literatürün Derlenmesi
15:15	Dilan Tümer Batar - Arş.Gör. Gökselin Özgen - Prof.Dr. Evren Homan Gökçe	Yeni Nesil Peptit İçeren Yaşlanma Karşıtı Etkili Koloidal Sistemlerin Tasarlanması ve Kozmetik Uygulamaları
15:30	Ozan Ünsalan - Doç.Dr. Özkan Doğanay	Artemitinin P13kα Modülatörü Olarak İncelenmesi: Doğal ve Mutant Formlar Üzerine Kenetlenme Tabanlı Bulgular
15:45	Erengül Kanat - Doç.Dr. Hülya Çakır Karabaş	Radyolojik Görüntülerde Periodontal Kemik Kaybının Yapay Zeka ile Tespiti: Güncel Bir Değerlendirme
16:00	Araştırmacı Sabiha Sena Deveciler - Prof.Dr. Zeynep Karapınar	Balıkesir İlinde Sığır, Koyun ve Keçilerde Akabane Virus (Akav) Enfeksiyonunun Serolojik Olarak Araştırılması

İÇİNDEKİLER

EĞİTİM SOSYAL BİLİMLER

Makale Adı

Yazar Adı

S.No

YAPAY ZEKÂ ÇAĞINDA YABANCI DİL EĞİTİMİ İÇİN ÖĞRETMEN YETERLİKLERİNİ YENİDEN DÜŞÜNMEK: KURAMSAL BİR ÇERÇEVE	BORA BAŞARAN	2
SAATLERİN VE SINIFLARIN ÖTESİNDE: YAPAY ZEKÂ, ROBOTİK OTOMASYON VE ÇALIŞMA İLE EĞİTİMİN YENİDEN YAPILANDIRILMASI	BORA BAŞARAN	16
KRİPTO PARA: YATIRIMCILIK MI, KARANLIK KİŞİLİK Mİ? (1)	NİSANUR AK, TURGUT TÜRKDOĞAN	28
CUMHURİYET DÖNEMİ ANTİK ROMA'SINDA KADINLARIN STATÜSÜ	TUĞBA VAMİN	39
TEDARİK ZİNCİRİ YÖNETİMİNDE RADYO FREKANSLI TANIMLAMA SİSTEMLERİNİN KULLANIMI	HAKAN KILCI	49
İRAN'DA MUHALİF BİR SES: MOLLA NASREDDİN'İN TEBRİZ SERÜVENİ	AYNUR ASGAROVA PINAR	57
FİZİK EĞİTİMİNDE GÜNCEL DİJİTAL TEKNOLOJİLERİN KULLANIMI ÜZERİNE MAKALELERİN İÇERİK ANALİZİ	MOJTABA ABDOLLAHZADEH, VOLKAN	72
GÜNÜMÜZ TÜRK SANATINDA KİTSCH'İN GÖRÜNÜMLERİ: REFLEKTİF KULLANIM İLE YÜZEYSEL ESTETİK ARASINDA	ZEHRA GÜLEN TURAN, AYÇA TUFAN BAKNALI	78
BEDEN EĞİTİMİ ÖĞRETMEN ADAYLARI İLE DİĞER BRANŞ ÖĞRETMEN ADAYLARININ AKADEMİK MOTİVASYON VE MOTİVASYONEL ÇALIŞMA KOŞULLARININ İNCELENMESİ	REYHAN ALAÇAM , KEVSER CEREN ÇOŞKUN , İLKNUR YAZICILAR ÖZÇELİK	89
İYAD KUNEYBİ'NİN İNAS ADLI ROMANININ TEKNİK İNCELEMESİ	MUHAMMED NUR KABBANİ	102
21.YY. GÖRSEL İLETİŞİM TASARIMINDA FRİG KÜLTÜRÜNÜN GÖSTERGEBİLİMSSEL ÇÖZÜMLEMELERİ VE BİR UYGULAMA ÖRNEĞİ	SÜMEYYE KAVUTCU, BİLGE KINAM	113
KASSAM TUGAYLARI SÖZCÜSÜ EBU UBEYDE'NİN DEMEÇLERİNDE TENAS VE RETORİK İNCELEME	RABİA YILMAZ	124
GERÇEKTEN KİM ÇEVRE DOSTU TÜKETİM YAPIYOR? SÜRDÜRÜLEBİLİR TÜKETİCİ PROFİLLERİNİN FARKLI YÜZLERİ	TUTKU EKER İŞÇİOĞLU	140
ÖNLEME VE İSTİHBARİ AMAÇLI İLETİŞİMİN DENETLENMESİ, KOŞULLARI VE ELDE EDİLEN VERİLERİN SUÇLARIN SORUŞTURMASI VE KOVUŞTURULMASINDA KULLANILMASI SORUNU	SABAHAT DEMİRCİ	152
TELEVİZYON YAYINCILIĞINDA İÇERİK DENETİMİ VE ETİK İHLALLER: TÜRKİYE ÖRNEĞİNDE BİR DEĞERLENDİRME	AYŞE NİLÜFER YILMAZ ATAY	162
RESİMLİ ÇOCUK KİTAPLARININ "ÇOK KÜLTÜRLÜLÜK" BAĞLAMINDA İNCELENMESİ: SİSTEMATİK DERLEME ÇALIŞMASI	CEMİLE BÜŞRA KESELİ, ESRA AKGÜL	167
TÜRK TANGOSUNUN DOĞUŞU VE GÜNÜMÜZ TEMSİLCİLERİ	EBRAR CEVHERİ	181
TÜRKİYE'NİN FINDIK İHRACATININ DIŞ TİCARETTEKİ REKABET GÜCÜNÜN DEĞERLENDİRİLMESİ	MUHAMMET KARANFİL, EDA ÇAĞLAR	189
ÇEVRECİ AMA FİYATA DUYARLI: SÜRDÜRÜLEBİLİR GİYİM TÜKETİMİNDE TUTUM-DAVRANIŞ AÇIĞI	TUTKU EKER İŞÇİOĞLU, İPEK GÜLER	196
SINIF ÖĞRETMENLERİNİN MATEMATİK DERS KİTABI ETKİNLİKLERİ HAKKINDAKİ GÖRÜŞLERİ: BİRİNCİ SINIF ÖRNEĞİ	FERİT ÖZKAYA, ÖZLEM TOKGÖZ	207
AB ÜLKELERİNİN İHRACAT PERFORMANSININ RCA AÇISINDAN İNCELENMESİ	KENFACK TSUETI JOSEPH VALDAIS	219

FEN VE MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ

KURAKLIK STRESİNİN TIBBİ BİTKİLERDE OLUŞTURDUĞU ETKİLER VE SAVUNMA MEKANİZMALARI	UĞUR TAN, HATİCE KÜBRA GÖREN	225
AUTOMATED GENERATION OF ENGINEERING REVISION COMPARISON REPORTS USING ROBOTIC PROCESS AUTOMATION IN PLM ENVIRONMENTS	BURAK BARIŞKAN	232
ARAÇ AYDINLATMA İÇİN OPTO-ELEKTRONİK GÜNCEL TEKNOLOJİLER	ENDER KUMRAL	242
KOLON TİP ELEKTRİK DESTEKLİ DİREKSİYON (C-EPS) SİSTEMLERİNİN ANALİZİ	BİRTAN GÜLER	253
ORJİNAL EKİPMAN ÜRETİCİSİ (OEM) ARAÇLARDA LASTİK KAYNAKLI KALİTE ALGISI ÜZERİNE YOL YÜZEYLERİNİN VE TEST KOŞULLARININ ETKİSİ: PARÇA VE YONGA AŞINMA MEKANİZMASI ÜZERİNE BİR ÇALIŞMA	BARIŞ ULUÇAY, BERKAY CEDETAŞ	258
GİZLİ AYDINLATMA SİSTEMLERİ	FURKAN CENGİZOĞLU	268
ÜÇ TEKERLEKLİ ARAÇLARDA DİREKSİYON ÇATALI TASARIMLARININ YAPISAL PERFORMANSI	MURAT AKDOĞAN	280
ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA DÜZ ORTA TABAN TÜNELİ VE FORMLU GÖVDE TÜNELİ STRATEJİLERİNİN MÜŞTERİ ALGISI VE İÇ MEKÂN DENEYİMİ AÇISINDAN DEĞERLENDİRİLMESİ	ENES CEBE	290
ARAÇ MOTOR BÖLMELERİNDE AKÜ TAVASI ÜZERİNDEKİ AKÜ MONTAJ TİPLERİ VE AVANTAJLARININ İNCELENMESİ	ENES CEBE, MÜCELLA GÜMÜŞ İMREN	297
BIW YAPILARINDA ALÜMİNYUM KULLANIMI: ÖNEMİ, AVANTAJLARI, ZORLUKLARI VE 2000'LERDEN GÜNÜMÜZE EVRİMİ	TAHSİN BATUHAN YILMAZ	307
OTOMOTİV SAC PARÇALARINDA GEOMETRİK TASARIMIN ÇARPIŞMA PERFORMANSINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ	ATAHAN GEN, BEYZANUR ERDEM	313
MİKROMOBİLİTE ARAÇLARININ ARKA SÜSPANSİYONU İÇİN SALINCAK KOLU KONSEPT TASARIM ÇALIŞMASI.	ONUR ONARLAR, MURAT AKDOĞAN, İBRAHİM İNAN, ZAFER GÜLER	320
YAPISAL MACUNLARIN ARAÇ GÖVDE PERFORMANSI ÜZERİNDEKİ ETKİSİ	NECDET SELİM KOÇYİĞİT, YAĞIZ SELÇUK, FERHAT CAN KÖSE	327
OTOMOTİV UYGULAMALARINDA GELİŞMİŞ YÜKSEK MUKAVEMETLİ ÇELİKLER İÇİN TASARIM KISITLARI VE ÜRETİLEBİLİRLİK DEĞERLENDİRMESİ	FERHAT CAN KÖSE, YAĞIZ SELÇUK, NECDET SELİM KOÇYİĞİT	333
OTOMOTİV GÖVDE YAPILARINDA KULLANILAN ÇOK KATMANLI KAPLAMA SİSTEMLERİNİN YAPISAL ÖZELLİKLERİ VE KOROZYON KORUMA PERFORMANSININ DEĞERLENDİRİLMESİ	FERHAT CAN KÖSE, NECDET SELİM KOÇYİĞİT, YAĞIZ SELÇUK	339
OTOMOTİV A SÜTUNU YAPILARINDA MONTAJ KALİTESİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ İÇİN DATUM STRATEJİSİ VE TOLERANS ZİNCİRİ ANALİZİ	FERHAT CAN KÖSE, NECDET SELİM KOÇYİĞİT, YAĞIZ SELÇUK	345
AKUSTİK İSTERİ OLAN OTOMOTİV PLASTİK PARÇALARININ TESTLERİ VE TEST YÖNTEMLERİ	AHMET SUCU	351
ESTETİK PLASTİK PARÇALARDA GÖRSEL KALİTE HATALARI VE TASARIM PARAMETRELERİNİN ETKİSİ	MÜMİN BAHAR, GÖKÇE ÖZYAPI	358
2K/3K ENJEKSİYON TEKNOLOJİLERİNDE TASARIM VE PROSES YAKLAŞIMLARI İLE OTOMOTİV DIŞ TRİM PARÇALARINA SAĞLADIĞI AVANTAJLAR	MÜMİN BAHAR, AHMET SUCU, GÖKÇE ÖZYAPI	363
OTOMOTİV DIŞ TRİM UYGULAMALARINDA LOGO ÜRETİM TEKNOLOJİLERİ: DEKORASYON YÖNTEMLERİ VE ARAÇ SEVİYESİ DOĞRULAMA SÜREÇLERİ	MISRA NUR ÖZCAN, GÖKÇE ÖZYAPI	372
OTOMOTİVDE TERMAL YÖNETİM VE AERODİNAMİK PERFORMANSTA HAVA YÖNLENDİRİCİ BİLEŞENLERİN ROLÜ	UMUT AKGÜN, GÖRKEM ÖZTAŞ	378
INVESTIGATION OF VORTEX GENERATOR EFFECTS ON INTERIOR AEROACOUSTIC NOISE IN THE A-PILLAR AND SIDE MIRROR REGION OF A PASSENGER CAR	AYHAN YAĞCI, MUHAMMED TAHA SIRMA	386
KAYNAK GEOMETRİSİNİN VE PROSES DEĞİŞKENLİĞİNİN BİR PROTOTİP AMORTİSÖRÜN DAYANIKLILIK PERFORMANSI ÜZERİNDEKİ ETKİSİ	FURKAN MAHİR TAŞATAN, GÜRHAN ALTINEL	395
KURŞUN-ASİT AKÜLERDE DERİN ÖĞRENME TABANLI PERFORMANS DEĞERLENDİRMESİ	MELTEM SÜPÜRTÜLÜ, ERSEN YILMAZ	405

EMEA VE NAFTA ÇARPIŞMA TESTİ GEREKLİLİKLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI VE ARAÇ GÖVDESİ (BIW) TASARIMINA ETKİLERİ	ABDULMECİT AYDIN	413
OTOMOTİV SEKTÖRÜNDE ÇEVİRİMİÇİ SATIŞ MODELİNİN ELEKTRİK-ELEKTRONİK SİSTEM FONKSİYONLARINA ETKİSİ: OTA, UZAKTAN TEŞHİS VE SİBER GÜVENLİK PERSPEKTİFİ	SERKAN DEMİR	422
STANDARD DIAGNOSTIC TOOLS IN THE AUTOMOTIVE INDUSTRY	GÜRKAN ERTUĞRAL, MELTEM SÜPÜRTÜLÜ	431
A BRIEF REVIEW OF OTA-BASED VEHICLE DEVELOPMENTS IN THE AUTOMOTIVE	MEHMET BERHAN BAY, MELTEM SUPURTULU	442
EFFECT OF DOUBLE HINGE LINE APPLICATION ON A-PILLAR TRIM SAFETY SYSTEM PERFORMANCE	MEHMET AYDIN	453
ÖN VE ARKA ZEMİN HALISI PUR KÖPÜK TANIMINDA SERTLİK İYİLEŞTİRMESİ İÇİN DEĞİŞİKLİK: 332 PROJE ÖRNEĞİ	HÜSEYİN OĞUZ CİVCİK	459
MEASUREMENT STRATEGY IMPACT ON GAP & FLUSH CORRELATION IN AUTOMOTIVE INDUSTRY	FURKAN ALEMDAR, ÖMER FARUK YÜCEL	465
OTOMOTİV SEKTÖRÜNDE PROJE YÖNETİMİ UYGULAMALARI: SÜREÇLER, YÖNTEMLER VE STRATEJİK ETKİ	HAMİ GÜLER	475
OTOMOTİV ARKA LAMBALARINDA ŞEFFAF DIŞ LENSLE İÇİN UV DAYANIMI: İÇ BİLEŞENLERİN BAĞIMSIZ UV STABİLİZASYONA İHTİYACI	BAŞAR UTAŞ	481
WELDİNG AND CHARACTERİZATION OF INCONEL 718 AND PH 17-7 STAINLESS STEEL ALLOYS VİA LASER WELDİNG	KÜBİLAY ÖZTÜRK, ALPTEKİN KISASÖZ, MUSTAFA TÜMER	489
ARAÇ ELEKTRİK ELEKTRONİK MİMARİSİ VE HABERLEŞME AĞININ EVRİMİ	SİLA BOZEN TAŞÇI, BERKANT AHMET	495
GÜVENLİK STANDARTLARININ ARAÇ EE MİMARİ İNTEGRASYONU	MUSA YILMAZ, İSMAİL GÜRBÜZ	511
ENDÜSTRİYEL SÜRÜCÜLERDE ZAMANLAYICI TABANLI DARBE YAKALAMA VE SAYAÇ TABANLI KUADRATÜR KOD ÇÖZME METODOLOJİLERİNİN KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ	ALİ ENES TEMİZKAN, MEHMET DAL	526
INVESTIGATION OF AUTOMOTIVE FIXED GLASS BONDİNG PROCESSES: COMPARİSON OF PRIMERED AND PRİMERLESS SYSTEMS	ONUR KOZBAY	538
ARAÇLARDA KULLANILAN CAM ÖNÜ PLASTİK PARÇALAR: FONKSİYONEL ROLÜ, MALZEME VE ÜRETİM SÜREÇLERİNE GENEL BAKIŞ	HİLAL ALIN	549
OTOMOTİV CAMLARININ SÜRÜCÜ VE YOLCU GÜVENLİĞİNE ETKİLERİ	HİLAL ALIN	556
BELGE ANLAMA SİSTEMLERİNDE FARKLI OCR PARADİGMALARININ KARŞILAŞTIRILMASI	ALAEDDİN TÜRKMEN, BARIŞ BAYRAM, AHMET ÇAY	562
AISI 304 HAMMADESİNDE FARKLI PARAMETRE VE KAYNAK TELLERİ KULLANILARAK YAPILAN KAYNAK İŞLEMİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİNİN İNCELENMESİ	ZEKİ KAYA, SERKAN APAY	568
DOĞAL KAÜÇUK ESASLI OTOMOTİV TİTREŞİM ÖNLEYİCİ ELEMANLARDA VULKANİZASYON DAVRANIŞININ DEĞERLENDİRİLMESİ	SİNAN DEVECİ, MERAL AKKOYUN KURLTU	578
E195 HAMMADESİNDE FARKLI PARAMETRE VE KAYNAK TELLERİ KULLANILARAK YAPILAN KAYNAK İŞLEMİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİNİN İNCELENMESİ	TAHİR ARAZ, SERKAN APAY	581
POLİKARBONAT OFTALMİK LENSLEİN KESİM SÜRECİNDE OLUŞAN MİKROPLASTİKLEİN TESPİTİ	TESLİME ÖZBAY, ERDİNÇ TİMOÇİN	588
COEFFICIENT ESTIMATES FOR CERTAIN SUBCLASSES OF ANALYTIC FUNCTIONS	OSMAN ALTINTAŞ, ASLAN BAHTİYAR	595
RİZE VE AKÇAABAT'TA MAKSİMUM YAĞIŞLARIN YENİLİKÇİ ŞEN YÖNTEMLERİYLE TREND ANALİZİ	OĞUZHAN VERİM, TURGAY PARTAL	601
MAMÜRATILAZİZ'DEN ELAZİĞ'A GEÇİŞ SÜRECİNDE KONUT MİMARİSİ VE SOKAK SİLÜETİNİN DEĞİŞİMİ	BERAT ASLAN, MUHAMMET KURUCU	615
YANIT YÜZEY YÖNTEM (RSM) TEKNİĞİNİN BOX-BEHNKEN TASARIMI (BBD) İLE MASERASYON EKSTRAKSİYON MODELLEMESİ KULLANILARAK KOYUN YÜNÜNDE ALKALİN HİDROLİZ YÖNTEMİ İLE KERATİN ELDESİ VE KARAKTERİZASYONU: KONYA MERİNOS YÜNÜ ÖRNEĞİ	ŞÜKRÜ ACAR	627

YANIT YÜZEY YÖNTEM (RSM) TEKNİĞİNİN BOX-BEHNKEN TASARIMI (BBD) İLE MASERASYON EKSTRAKSİYON MODELLEMESİ KULLANILARAK KOYUN YÜNÜNDEN ASİT HİDROLİZ YÖNTEMİ İLE KERATİN ELDESİ VE KARAKTERİZASYONU: KONYA MERİNOS YÜNÜ ÖRNEĞİ	ŞÜKRÜ ACAR	636
HİDROLİK POMPA BAĞLANTI PLAKALARINDA GERİLME AZALTIMI VE YORULMA ÖMRÜNÜN ARTIRILMASI İÇİN ŞEKİL OPTİMİZASYONU YAKLAŞIMI	MERİÇ BÜYÜKKOYUNCU, GAMZE ŞAŞMAZ, İBRAHİM GÖKÇE , TANER ÇELİK	645
LCL FİLTRELİ AKTİF ÖN KATLI (AFE) SÜRÜCÜ SİSTEMLERİNDE ,SEBEKE TARAFI HARMONİK ANALİZİ	BEYHAN KADİR TURGUT, MEHMET RECEP BOZKURT	656
ATIK BİMS TOZUNUN TEKLİ, İKİLİ VE ÜÇLÜ ATIK TOZ SİSTEMLERİNDE KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN HARÇLARIN TAZE HAL ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ	MESUT ŞİMŞEK, OSMAN HANSU, NİLDEM TAYŞI	673
ÇOCUKLUK EVLERİNE DAİR EPİZODİK ANILAR: MEKÂNSAL TETİKLEYİCİLERİN VE DUYGUSAL YOĞUNLUĞUN ROLÜ	ÖZGE SENA YILDIZ, DİLEK YILDIZ ÖZKAN	687
BİTKİ ISLAHININ AMAÇLARI	UĞUR TAN, HATİCE KÜBRA GÖREN	697
AĞ İLETİŞİM PROTOKOLLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI VE KULLANIM ALANLARININ BELİRLENMESİ	BERKANT AHMET, SİLA BOZEN TAŞÇI	703
IMPROVE VALIDATION PROCESS WITH CUSTOMER CONNECTIVITY DATA	CANSU HİDAYET KELEBEK	711
ÇANAKKALE İLİ, EZİNE İLÇESİ BİYOKÜTLE ENERJİ POTANSİYELİNİN İNCELENMESİ VE SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK AÇISINDAN DEĞERLENDİRİLMESİ	MESUT ÇETİNKAYA, GÜL EBRU ORHUN	722
BİTLOCKER ŞİFRELEME ANAHTARLARININ ELDE EDİLMESİNDE KULLANILAN YÖNTEMLERİN ADLİ BİLİŞİM KAPSAMINDA DEĞERLENDİRİLMESİ	MEHMET SEVİNÇ , AHMET ŞENOL	726

SAĞLIK BİLİMLERİ

ORTOPEDİDE YAPAY ZEKA: CERRAHİ SONUÇLARIN TAHMİNİ	SİDAR ÖZTÜRK	737
DİYABETTE KORNEA DEĞİŞİKLİKLERİ: SİSTEMİK MİKROVASKÜLER HASARIN ERKEN BİR BELİRTECİ	SİBEL ZORLU ÖZTÜRK	744
KEMİK İYİLEŞMESİNDE BİYOLOJİK DESTEKLEME: GERÇEKTEN SONUÇLARI İYİLEŞTİRİYOR MU?	ZAFER VOLKAN GÖKÇE	754
KOAH VE ASTİM HASTALARINDA İNHALER KULLANIMININ AĞIZ SAĞLIĞI VE BESLENME DURUMU ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ	HİLAL UYSAL, AYŞEGÜL OKYAY, ELÇİN KASAPOĞLU	769
PALYATİF BAKIM İHTİYACI OLAN YOĞUN BAKIM HASTALARININ AİLELERİNİN BAKIM YÜKÜ VE SOSYO-DEMOGRAFİK FAKTÖRLERLE İLİŞKİSİ	ELÇİN SEBAHAT KASAPOĞLU, FUNDA ÇAKIR, HİLAL UYSAL	775
NÖROLOJİK HASTALARDA ROBOTİK YÜRÜME DESTEK CİHAZININ ALGILANAN KULLANILABİLİRLİĞİ VE MEMNUNİYETİNİN İNCELENMESİ	OSMAN ÇOBAN, AYŞE NUR ŞEKEROĞLU	782
PEDİATRİK İNTRAKRANİYAL KİSTİK LEZYON KİST HİDATİK-OLGU SUNUMU	KÜBRA ARSLAN	792
UTERİN NADİR BİFAZİK KİTLE ADENOSARKOMA-OLGU SUNUMU	KÜBRA ARSLAN	796
TİROİDDE METASTATİK AKCİĞER ADENOKARSİNOMU: İMMÜNOHİSTOKİMYASAL BULGULAR EŞLİĞİNDE BİR OLGU	KÜBRA ARSLAN	801
PERİ-İMLANTİTİS TEDAVİSİNDE FOTO KÜRLENEBİLİR MELATONİN YÜKLÜ HİDROJELLER: FORMÜLASYON VE KARAKTERİZASYON	BİLGE EYLÜL ŞENTÜRK, ESRA KARATAŞ, HATİCE YEŞİM KARASULU	806
RADYOLOJİK GÖRÜNTÜLERDE PERİODONTAL KEMİK KAYBININ YAPAY ZEKA İLE TESPİTİ: GÜNCEL BİR DEĞERLENDİRME	ERENGÜL KANAT, HÜLYA ÇAKIR KARABAŞ	812

EĞİTİM VE SOSYAL BİLİMLER

Rethinking Teacher Competencies for Foreign Language Education in the Age of Artificial Intelligence: A Theoretical Framework

Bora BAŞARAN¹

¹bbasaran@anadolu.edu.tr; Anadolu Üniversitesi, Eğitim Fakültesi Fakültesi, Yabancı Diller Bölümü, Eskişehir/ Türkiye.

Özet

Yapay zekânın patlayıcı gelişimi, yabancı dil (FL) öğretmenlerinin mesleki görevlerini yerine getirmek zorunda oldukları koşulları yeniden tanımlamış ve bu durum, yabancı dil öğretmeni yeterliğinin kuramsal olarak temelden yeniden değerlendirilmesini zorunlu kılmıştır. Bu bölüm, Yabancı Dil Olarak Almanca (DaF) öğretimi temelinde, yapay zekâ çağında yabancı dil öğretmeni yeterliğini anlamaya yönelik bir çerçeve geliştirmeyi amaçlamaktadır. Öğretmen yeterliği kuramları, dijital yeterlik çerçeveleri, yapay zekâ aracılı öğretim ve öğrenme araştırmaları ile kültürlerarası eğitim olmak üzere dört farklı kuramsal alandan hareketle; alan temelli pedagojik yeterlik, dijital ve teknik yeterlik, yapay zekâ aracılı pedagojik yeterlik ve kültürlerarası-yansıtıcı yeterlikten oluşan dört bileşenli bütünlük bir model önerilmektedir. Bu yaklaşıma göre, yapay zekâ yeterliğine sahip yabancı dil öğretmeni, artık yalnızca dijital teknolojilerle desteklenmiş geleneksel öğretmen figürü değildir; aksine, teknolojik potansiyel ile pedagojik hümanizm gerekliliği arasındaki karşılıklı içinde şekillenen yeni bir yeterlik anlayışına sahip öğretmendir.

Anahtar Kelimeler: Yapay zekâ aracılı pedagojik yeterlik, dijital yeterlik, kültürlerarası yeterlik, öğretmen yeterliği

Abstract

The explosive advancement of artificial intelligence has redefined the conditions in which FL teachers have to perform their professional duties, making a fundamental theoretical reevaluation of FL teacher competency absolutely necessary. The following chapter will attempt to develop a framework for an understanding of FL teacher competence in the AI era on the basis of teaching German as a foreign language (DaF). Drawing from four different theoretical fields, namely the theories of teacher competency, digital competence frameworks, research on AI-mediated teaching and learning and intercultural education, we put forward a four-part integrated model consisting of the disciplines-based pedagogical competence, digital and technical competence, AI-mediated pedagogical competence and intercultural-reflexive competence. In this conception, the AI-competent FL teacher no longer figures as the one we know today enhanced by some digital technology, but as an AI-competent teacher whose competence is formed by the mutually conflicting relationship of technological potential and the pedagogical imperative for humanism.

Keywords: AI-mediated pedagogy, Digital competence, Intercultural competence, Teacher competence

INTRODUCTION

The recent boom of AI in a multitude of fields is significantly disrupting conditions not only for teachers across all subject areas, but particularly within foreign languages, especially German as a Foreign Language (Deutsch als Fremdsprache, DaF). While AI is typically seen as supplementary knowledge for science teachers, FL teachers' work involves language, cultural learning, translation and interpretation; things that conversational AIs, intelligent grammar tools, writing assistants, or voice analyzers now actively manipulate and influence. This chapter explores these shifts through a critical theory lens on teacher competence. It considers how the use of AI in FL teaching can't be seen as an additional competence, rather, it fundamentally reframes teacher competence as such. Accordingly, it raises the central question: What do FL teachers need to know, be able to do and be disposed toward in a professional setting profoundly mediated by intelligent technologies? To answer this, the chapter provides a critical overview of the current relevant theoretical and empirical knowledge of teacher competence, digital/technological competence, AI competence frameworks and the intercultural competence of FL teachers to inform an AI-centric perspective of teacher competence in FL, focusing on specific aspects for teaching German as a foreign language. DaF teaching is embedded within European language education policies and normative instruments, such as the Common European Framework of Reference for Languages Companion Volume (Council of Europe, 2020). The chapter is structured as follows. Section 2 provides an overview of the current state of research on teacher competence in Europe, focusing on the main dimensions of knowledge, skills and dispositions of teachers in a range of subject areas. Section 3 explores the institutionalization of digital competences of teachers. Section 4 gives an overview of the technological pedagogical content knowledge (TPACK) model and recently updated TPACK towards AI in teaching. Section 5 elaborates on the impacts of the emerging AI technologies in FL teaching in terms of changing teachers' professional practices, roles and their sense of professional self. Section 6 gives a brief overview of the recent policy and research landscape related to AI competence frameworks for teachers in general. Section 7 explores the intercultural dimension of FL teacher competence and related new challenges in AI-mediated learning for intercultural pedagogy in DaF teaching. Section 8 presents a four-domain model for AI teacher competence in DaF, consolidating the results of the theoretical review and Section 9 discusses the implications for DaF teacher training programs and avenues for empirical research on the AI-competent FL teacher in Germany.

Conceptualizing Teacher Competency: Foundations and Structural Debates

The theory of teacher competency has been explored in several different research traditions across several nations and throughout the European continent. Fundamentally, the theory denotes the complex package of knowledge, abilities and predispositions necessary for a teacher to function in a competent and liable fashion within her diverse working environments. Crucially, competency has never been regarded either merely as explicit propositional knowing or simply as a portfolio of readily observable behavioral actions but instead as the ability to use diverse cognitive and affective abilities or personal dispositions when responding to concrete demands on the job of teaching in various social contexts of the classwork (Collenberg, 2020, pp. 24, 26, 32, 33, 39, 54). One highly structural model of the theory of professional action competency distinguishes between Wissen, Fertigkeiten and Einstellungen as the central, structural constituents of competency and this tripartite model is widely

acknowledged as standard within European competency theory and in various educational policy frameworks. Collenberg's empirical study of developing intercultural competencies of teachers (Collenberg, 2020, pp. 100, 102) uses precisely these structural constituents as her theoretical framework, outlining knowledge of cultural differences, practical competences to handle multicultural classes and attitudes toward difference as the three distinct pillars of intercultural Lehrkompetenz, so that she was able to describe competencies adequately in their entire spectrum (including affective dimensions) without thereby diminishing professionalism to merely the domain of cognitive performance or mechanical abilities. While a general competency model describes pedagogical tasks and competencies that apply to teaching across all subject areas, such as classroom management, assessing and diagnose individual students, responsiveness to classroom climate and providing communicative scaffolding, this approach has its limitations concerning the teaching of languages, for instance, for a wide variety of specific professional requirements that don't arise from the generic skills of teaching alone: profound subject matter knowledge (in terms of knowing the L2 and L3 and further foreign languages), a mastery of theories and frameworks of second-language acquisition and learning, knowing appropriate methods and strategies (communicative and task-based) for language pedagogy, and, of course, teaching languages within an intercultural perspective all seem to be essential components that cannot be derived solely from general frameworks on teacher competencies. The CEFR Companion Volume (Council of Europe, 2020, e.g., pp. 6, 53, 85, 86, 92, 94, 96) outlines most exhaustively a set of competencies pertinent to FL teaching in a European setting, emphasizing, in particular, the development of mediators and of a plurilingual and pluricultural competence (comprised of mediation competencies and a plurilingual and pluricultural repertoire). Third, the competency framework's link to teacher identity is a topic that needs to be highlighted in a post-competency era framework because many competency theories organized by observable achievements are criticized for merely defining an audit trail of successful teaching acts or behaviors and overlooking the complex interconnections of a teacher with others, her professional biographies, as well as the reflexive element of professional practice. Collenberg captures this aspect perfectly in the developing intercultural competence process (Collenberg, 2020, pp. 39ff) when she describes the necessary personal stance that requires not just the ability to repeat learned knowledge but the will to look reflectively back on the own assumptions about culture, the open willingness to face intercultural difference with intellectually rigorous curiosity and ethical earnestness and to offer learning spaces which reflect and celebrate the diverse resources of learners to speak and act in many different languages and in different ways of expressing diverse social behaviors. This becomes an especially important issue in the age of AI, where FL teachers face new teaching technologies and related new job descriptions that call into question their own identity, epistemic authority and value.

Digital Competencies as a Core Professional Expectation

In recent years, digital competency has been established as an essential professional attribute for teachers following policies implemented at the European and national levels. In line with the European Digital Education Action Plan 2021, 2027 (European Commission, 2022), the EU intends to create a fair, accessible and affordable system of digital education, for which a fundamental prerequisite is enabling teachers to effectively harness digital technologies, learn how to integrate digital learning into teaching practices and equip students with the necessary skills for a digital society. With this policy objective set, the European Framework for the Digital Competence of Educators (DigCompEdu,

Vuorikari, Punie, van den Brande, & Berger, 2017) has become the most widely referenced framework in the field of digital teacher competency across European countries and teacher education programs (Basilotta-Gómez-Pablos, Espino-López, Giné, Otero-García, & Saura-Fuentes, 2022).

DigCompEdu defines teachers' digital competency across six professional areas: "Professional Engagement," "Digital Resources," "Teaching and Learning," "Assessment," "Empowering Learners," and "Facilitating Learners' Digital Competence" (Vuorikari et al., 2017). The framework promotes an integrated understanding of digital competence as being embedded within the specific pedagogical and institutional practices in schools and professional settings, moving beyond a purely technological notion of literacy as technical skills in using digital devices (Basilotta-Gómez-Pablos et al., 2022). In a bibliometric analysis of 1,803 publications on teacher digital competencies in higher education in Europe from 1998 to 2020, Basilotta-Gómez-Pablos et al. (2022) confirmed that DigCompEdu emerged as the most referred-to digital competence framework, noting at the same time a deficit of empirical studies examining the extent to which DigCompEdu can be effectively implemented and assessed validly in particular professional areas, such as foreign language teacher education.

Falloon (2020) proposed the Teacher Digital Competency (TDC) framework as a way of representing a teacher's professional knowledge as a multidimensional capacity, comprising social, cognitive, ethical and creative aspects. According to Falloon, the digital turn in teaching is the movement from a digital literacy understanding of teachers as functional consumers and producers of digital texts to digital competency, requiring teachers to engage with digital technologies not only as vehicles of instruction content but as media for creating knowledge, exploring, making, collaborating and communicating their professional values. This difference has huge consequences for Foreign Language (FL) teacher education: digital technologies are no longer neutral vessels for language learning content but active agents in shaping the communicative context and the personal engagement of learners.

In Germany, the Kultusministerkonferenz (KMK, 2021) described "Teaching and Learning in the Digital World" with an overarching goal: to prepare learners appropriately for participation in an increasingly digital world. In doing so, "all teachers [...] should acquire the competence required to use digital technologies as both teachers and learners of content, within their subject discipline" and to apply this to the field of digital competence, defined as encompassing domain-general competencies of teachers and subject-specific competencies for students and teachers within subject areas at all levels and across all disciplines. Thus, KMK acknowledges that digital competence isn't a single skill that can be uniformly transferred and that requirements will differ for teachers of different subjects and age groups. For DaF (German as a Foreign Language) teachers in particular, this means moving from basic digital literacy toward specific competence in using digital technologies (and AI, which is an emerging topic within digital technologies) to facilitate communicative language learning and teaching and to promote the use of German in authentic contexts of language communication, learning to achieve proficiency as part of plural and cross-cultural competence. Digital competency thus acts as a bridge between a general digital literacy understanding and the subject-specific competences required for FL teachers working with digital technologies.

From TPACK to Intelligent-TPACK: AI-Mediated Pedagogical Content Knowledge

The Technological Pedagogical Content Knowledge (TPACK) is one of the most widely cited models and influential theories in technology integration and teacher education worldwide. The theory posits that technology integration shouldn't focus on TK, PK, or CK in isolation, but rather on the confluence of those knowledge domains: $PK+CK=PCK$, $PK+TK=TPK$, $CK+TK=TCK$, and, in sum, the combination of TK, PK and CK=TPACK. In other words, knowledge associated with integrating technology requires a deeper professional knowledge base derived from the intersection of teachers' knowledge of technology, pedagogy and content. In FL classrooms, TPACK research has been instrumental in demonstrating that effective use of FL educational technologies depends on not only technical skills but pedagogical knowledge that's responsive to how technology might change communication opportunities with FL learners, assist them in becoming language users and support their understanding of language and culture of FL speakers.

Given that AI technologies may be seen as qualitatively different from conventional digital tools, there has been an active and productive theoretical debate around whether TPACK should be reconceptualized for the new era. Celika (2023) has introduced the concept of Intelligent-TPACK (I-TPACK) to meet this theoretical demand based on research with pre-service and in-service teachers. Based on his research findings with both pre-service and in-service teachers, Celik argued that AI tools introduce another type of professional knowledge called AI Knowledge (AIK) which needs to be blended with TP and CP in ways that were distinct from earlier digital tools. That's, while integrating AI tools with pedagogy and content, teachers had to consider AI transparency, computational bias, AI data ethics, as well as the distribution of pedagogy (i.e., who is the main teacher, AI or the human teacher?), that did not exist in older TPACK models.

For FL teachers using AI writing/correction/chatbot tools for teaching/learning, Celik points to several key demands relevant to the context of FL: First, FL teachers, who would likely be using AI tools, must possess not only the technological knowledge of how AI works but also and more importantly, substantive pedagogical knowledge on how AI interacts with L2 acquisition: Whether AI-fed feedback hinders or facilitates interlanguage development? whether AI output that converses with students offers sufficient quantity of comprehensible input to second language learners? and Whether AI correctness systems address pragmatics and sociolinguistics rather than only surface-grammatical aspects of language use? These questions are relevant because they all require integrating AIK with an in-depth pedagogical knowledge based on FL/SLA research. Second, FL teachers teaching German might use these AI tools that generate German language output. The majority of those tools rely heavily on large corpora, dominated by the formal-register writing of speakers of a majority culture. The FL teachers therefore must develop the knowledge base and competence to critically analyze AI-generated content in the FL for pedagogical purposes (appropriacy, authenticity), or for its reproduction of language and cultural biases (Godwin-Jones, 2022).

A third conceptually profound challenge is that of authenticity, or what it means for language production to be "authentic" in FL learning in the AI age. Authenticity is put forth by the CEFR Companion Volume (Council of Europe, 2020) as central to communicative language teaching and refers to how the use of real-world mediation and plurilingual repertoires makes communicative

language teaching and learning "authentic." As AI tools are now capable of producing grammatically and pragmatically viable output of language across multiple genres and registers, FL teachers will face the educational problem of redefining authenticity as an orienting framework, reevaluating error as a crucial aspect of the language learning process and rethinking communicative tasks, as well as the performance assessment of FL, in the context where AI assistance is easily accessible to students at any level of their proficiency.

Artificial Intelligence and the Transformation of Foreign Language Teaching

AI has been and continues to be seen not so much as a new class of tools to an otherwise stable language teaching model, but as a changing ecological surrounding within which languages are learned and taught. Holmes & Tuomi (2022), in their influential state-of-the-field overview, distinguish between AI supporting an instructor, such as a grammar correction tool supporting an instructor's efforts. AI supports pedagogy where the teacher remains central in its use. AI transforms pedagogy by transforming pedagogical activities. AI disrupts pedagogy by challenging the core teaching professional tenets of the discipline itself. All three influences are concurrent in FL teaching today and bear different implications for instructor competency. For example, AI provides opportunities at a supplemental level, such as a grammar correction tool that improves feedback immediacy and allows for differentiation that no human can replicate without enormous support, or a system that adapts practice activities based on individual performance. These changes, however, require of instructors, at a minimum: knowing how to evaluate and critique an AI tool and communicate to students what the AI can do and what it can't, integrating AI-generated corrections or recommendations into lessons logically and not ad hoc and exercising good judgment about when AI feedback might be wrong, contextualized poorly, or is otherwise not in the student's best interests to act upon. Crompton and Burke (2023). Generative AI such as LLMs, in particular, presents opportunities and challenges that transform the discipline at a level that may warrant reconceptualization. For example, LLMs can now produce texts across a variety of contexts, registers and lengths, they can now take part in lengthy and subtle conversations in a range of target languages, they can give students explanations of why they chose specific pragmatic expressions in different cultural settings and can provide targeted and immediate feedback beyond what any single teacher possibly could. As Kasneci, Y. et al. (2023) pointed out, the affordances of LLMs such as that students can converse on demand in an FL and in situ and in culturally appropriate contexts and receive adjusted comprehensible input that meets students where they're. As a result, students now stand a far better chance to achieve fluency when an AI partner provides an alternative opportunity for conversation, cultural and language immersion activities set within contexts and the chance to receive comprehensible input appropriate for their individual level. Kasneci, Y. et al. (2023). Conversely, students can fall into the habit of depending too heavily on scaffolds and struggle learning because they can't independently solve language challenges. Students also face bias that can perpetuate stereotypes as LLMs were trained using data from a range of sources, some of which have biased views. According to Godwin-Jones (2022), one framework for reconceiving the role of AI in teaching an FL can be found in partnership, in which instructors engage AI partners with their affordances and their limits as they use it to support FL teaching. With the introduction of AI technologies in FL teaching, the instructor's ability now includes an evaluation not simply on instrumental use but also evaluation on the AI's perspective in multiple senses: as an educator, linguistic, culturally aware interlocutor, ethical interlocutor and then contextualizing how it adds value to lessons and language learning. He argues against the view of AI as

a teacher surrogate and that an instructor controls AI technology. Instead, he presents AI as a professional language education partner. AI now challenges teaching assumptions such as when learners acquire target language use when it comes at the expense of effort and study, when real conversations require human partners, or how an FL teacher adds value to a classroom experience or lesson, as an AI tool might provide useful conversation support. Instead, teachers' unique value of having real human judgment, having real human interpersonal warmth and presence in a language classroom, having cultural knowledge and intelligence, having wisdom and judgment on ethics and knowing how to help facilitate authentic conversation that can only be mimicked by AI at present now become more critical in FL classrooms that have become even more dependent on AI assistance. UNESCO (2023).

Emerging AI Competency Frameworks for Foreign Language Teachers

With AI technologies constantly developing and becoming more prevalent in educational settings, scholars and institutions are beginning to think more about AI literacy for teachers across disciplines. Although the scholarship in this area is still somewhat conceptually fluid and not extensively tested, three main, interconnected approaches to identifying these competencies are emerging that are very relevant to FL teachers and their education:

The first supranational attempt at delineating general principles and requirements is UNESCO (2023) Guidance for Generative AI in Education and Research. While not a competency framework in the sense of a curriculum design document, UNESCO outlines key skills teachers in every discipline need: a critical understanding of how to verify the accuracy, truthfulness and appropriacy of AI-generated content, awareness of ethical issues, including AI's predisposition toward bias, data protection, intellectual property rights and the risk of widening access inequalities, an ability to integrate AI in ways that align with established educational purposes and principles and an ethical responsibility to facilitate AI literacy in learners as an essential 21st century competence. The UNESCO guidance underscores that these are domain-specific rather than general competencies, such that an FL teacher's needs will differ from a mathematics or science teacher's needs since AI will have unique implications in each area due to the specific activities and goals involved.

In their 2023 review of AI technologies in higher education, Crompton and Burke noted an ever-present gap between interest in the technology and teacher preparation, finding that AI competency isn't simply a matter of learning how to use certain tools but rather how to use them critically and responsibly within pedagogy. This aligns closely with the view from Digital Competency research as popularized by Falloon (2020) and backed by data by Basilotta-Gómez-Pablos et al. (2022) on how true competency with educational technologies requires pedagogical expertise and ethical awareness regarding how and when to implement them, rather than just knowing the technical skills involved. Crompton and Burke identified three major areas for teacher training in AI: skills involving the use and critically evaluating content produced by these technologies, the integration of AI in curricula and pedagogy and ethical and policy aspects related to AI in education.

Focusing on large language models in education, Jeon and Lee (2023) suggest that AI technologies should be thought of as supplementary and not competing with human educators in a FL context. Their view hinges on the idea that the role of human educators and LLMs should be characterized by complementation, not competition, which is highly relevant for understanding what

competencies FL teachers need. In an LLM era, FL teachers' critical competency revolves around teaching and enacting those parts of their job that remain and will always remain inherently human: cultivating communicative interaction, interacting cross-culturally, making judgment decisions informed by cultural nuances, providing useful feedback responsive to the learner's entirety, rather than just the product of a surface-level grammar checker. For DaF teachers in particular, these areas are tied intrinsically to the intercultural and communication objectives of language education and can't truly be provided by any system based on LLMs at present.

Combining themes from these approaches, we can identify the following four core areas of AI competency for FL teachers: (1) AI literacy, a critical, nuanced understanding of what AI language systems are and do, how they produce content, their strengths and weaknesses, (2) critical AI engagement, the evaluative ability to appraise AI outputs for language correctness, cultural authenticity, suitability for pedagogical purposes and the presence of bias, (3) AI-informed pedagogical design, the capacity to integrate AI purposefully into language learning processes that support, rather than undermine, language acquisition, cross-cultural learning and learner autonomy and (4) AI ethics, the professional competence to manage and interpret complexities and value judgments concerning data privacy, bias, equality in education and academic honesty when working with AI technologies in language education.

The Intercultural Dimension: Cultural Mediation in AI-Mediated DaF Education

Intercultural competence occupies a central and structurally privileged position among the components of domain-specific professional knowledge for foreign language teachers, reflecting the inherently cross-cultural nature of language learning and teaching, which invariably involves encounter and mediation with cultural difference. In German as a foreign language (DaF) teacher education, intercultural communicative competence is thus not a superfluous add-on to linguistic knowledge and professional skills, rather, it's a constitutive feature of professional identity: the DaF teacher mediates between the students' own cultural systems, value frames and communicative conventions and the socially and historically inscribed world of German language and German-speaking cultures. This simultaneously linguistic, cultural and educationally intended mediating position is the dimension of professional FL teacher practice most critically challenged and urgently requiring reconsideration in the age of AI.

Collenberg (2020, p. 70; 71) outlines a structure of intercultural teacher competence relevant to the scope of this essay in terms of learning domains. She suggests viewing intercultural competence through the W-F-E model (Wissen, Fertigkeiten, Einstellungen), subdivided into three mutually dependent domains relevant here: differenz, focusing on sociocultural difference (with regard to the learners' identity and pedagogical practice), kommunikation und antirassismus, examining communication in its cultural and antiracist dimensions and didaktik, integration und schulerfolg, addressing the didactic component in terms of planning intercultural, inclusive learning environments and promoting students' academic success. Collenberg forcefully argues, both empirically and theoretically, that while domain-specific knowledge and skills must be acquired, the cultivation of a reflexive stance, in particular, the teacher's awareness of their own cultural biases, values and ways of

seeing and acting, is essential and irretrievable to genuine intercultural competence in a professional teaching context.

The CEFR Companion Volume (Council of Europe, 2020) constitutes the relevant standard framework for German teachers. It significantly updates and extends the intercultural model outlined in the earlier CEFR volume by introducing the pluricultural concept, the ability to mobilize different cultural repertoires in multiple ways, mediate between cultures and foster the plurilingual and pluricultural identity of learners in a way that's not simply the national/linguistic tradition. Pluriculturality resonates deeply with the everyday German classes of the 21st century, in which young people learn German not in a cultural vacuum but often as one among a multitude of heritage languages, other languages from neighboring countries and beyond and in transnational cultural and communicative practices and attachments.

Two particularly significant and interdependent challenges for the intercultural dimension of FL teachers' professional competencies stem from the use of AI tools. Firstly, German language generated by AI systems, whether spoken in conversations with chatbots, presented as explanatory text, included in reading materials, or staged in a realistic communication scenario, largely draws from and reproduce the cultural biases within the predominantly majority culture, formal register and Geographically biased training corpuses of language models. As a result, AI-generated German is likely to perpetrate cultural stereotypes, homogenize the linguistic diversity of German-speaking societies, hide German speakers of migrant origin, downplay regionalisms in language and culture, ignore minority languages such as Frisian, Danish or Sorbian and generally present a flattened and overly normalized and idealized cultural picture of the German-speaking world. Teachers need the specific practical skill of discerning these biases and deficits. More importantly, they're expected to supplement the AI output by using linguistically diverse, regionally and sociolinguistically representative and authentically produced sources, thus modeling critical and reflection-conscious interaction with AI-generated culture representations for learners (Godwin-Jones, 2022).

Secondly and at a pedagogical level, conversational AI agents subtly alter the encounter with real intercultural encounters in language education. Communication in genuine intercultural encounter with others, with their otherness, in a setting in which the participants are vulnerable to a degree of risk (reciprocal uncertainty), their motives are significant to each other and the encounter is, one way or another, costly, is one goal of communicative foreign language teaching, for German teachers it's a core aspect of professional practice (Schäfer, 1997). AI chatbots simulate key elements of such encounter. They offer verbally fluent conversation partners who model appropriate target-language use and social conventions and even demonstrate specific cultural practices. As UNESCO (2023) is cautioning in contrast to a host of positive remarks about conversational AI in intercultural contexts and as a century of intercultural research has warned, however, a simulation is never quite reality. This encounter lacks affective depth, mutual vulnerability, the actual risks of mutual misunderstandings or of offending each other and social components, all of which are characteristics of authentic human intercultural encounters (Bhambra & Williams, 2020, Bennett & Castiglione, 2020, Ouellet, 2009, Samovar, 2006). In view of such considerations, teachers must critically distinguish between pedagogically beneficial and

contextually limited use of AI-generated simulations of cultural encounters and those that might be harmful or that replace human contact vital for intercultural understanding by the mediated encounter of an algorithm.

Towards an Integrated Framework: The Four-Domain Model of FL Teacher Competency in the AI Era

The theoretically informed lines of argument reviewed earlier, namely, structural competency theory, various existing digital competency frameworks, TPACK extensions into AI-mediated pedagogy, AI transformations in the professional identity and practices of FL teachers, recently proposed frameworks for AI competence and the role of the intercultural dimension in the professional identity of FL teachers; do provide the foundation for hypothesizing an integrative theoretical model of FL teacher competence for AI environments. This hypothesis would need to take into account the multifaceted, domain-specific and developmental complexities inherent in the construction of professional knowledge by FL teachers, as well as prove analytical and pedagogical usefulness for designing teacher training programs, curriculum materials and professional development plans.

The proposed four-domain model is conceptualized along four domains that interconnect and interact dynamically with each other. Each domain involves a particular configuration of knowledge, skills and professional attitudes that are distinct but also in mutual dependence in teaching: expertise in one domain is limited or even detrimental without the appropriate level of expertise in the other three domains.

The first domain, Disciplinary Pedagogical Competency, embraces the professional knowledge FL teachers need in specific content fields as the basis of their teaching, regardless of the nature of the media through which their teaching practices might take place. This domain covers, on the one hand, profound and research-based knowledge concerning theories of second language acquisition and their respective pedagogical consequences. It also covers methodical competence with approaches like communicativeness, task-based teaching and content and language integrated learning, professional competence in the target language, sound knowledge of theories and methodologies of testing and evaluating in FL teaching and awareness of students' diverse linguistic backgrounds and prior experiences with learning languages. The Common European Framework of Reference for Languages Companion Volume (Council of Europe, 2020) provides the normative orientation in a European setting, outlining "Communicative Language Activities, Mediator Competences, Plurilingual repertoire" and "Pluricultural competence" as the four central goals of FL teaching. In DaF, this entails competence in standard and sociolinguistic variation of the German language, mastery of the specific methodological traditions in DaF and their research base, as well as knowledge of institutional and curriculum contexts where DaF is taught in various countries.

The second domain, Digital and Technological Competency, builds on disciplinary pedagogical competencies by incorporating the knowledge, skills and professional habits required to teach effectively and ethically in diverse technologically rich and digitally mediated settings. In line with the DigCompEdu framework provided in EU Commission (2022 policy) and the TDC framework of Falloon (2020), this entails the ability to employ digital technologies and platforms with competence and to assess critically which digital resources are suitable for educational use, design effective and coherent

digital learning environments, enable students to develop and independently utilize digital competencies, critically and reflectively address the ethical issues that the use of digital tools in learning contexts raises. In the context of FL teaching, this dimension is concretely formulated in terms of competence in using for pedagogical purposes digital communication tools, corpus tools, digital multimedia resources in the service of learning intercultural experiences and web-based authentic materials that foster genuine engagement with the target language.

The third domain, AI-Integrated Pedagogical Competency, encompasses the specific competencies FL teachers require, given the present widespread availability of advanced generative AI language tools, personalized adaptive learning platforms and AI-driven assessment solutions. In line with Celiks (2023) review of related scholarship and incorporating the work of Holmes and Tuomi (2022), Jeon and Lee (2023) and UNESCO (2023), this domain involves four interdependent skill areas: AI Literacy (a functionally informed critical understanding of the technologies, generative capabilities and limitations of generative AI language models), AI-Informed Pedagogical Design (the aptitude to integrate AI tools purposefully into a communicative sequence of activities in accordance with communicative and intercultural educational purposes), Critical AI Engagement (the skills to assess the content generated by AI for accuracy in the target language, cultural representativeness, register specificity and possible bias), AI Ethics (the capacity to responsibly negotiate the ethical considerations regarding the usage of data, fairness and transparency of algorithms, equality in access and academic integrity involved in the use of AI technologies in educational settings).

The fourth domain, Intercultural Reflexive Competency, situates FL teacher competence in its broader cultural, humanistic and relational aspects, irreducible to any technological or algorithmic ability and which will always be uniquely the mark of the professional FL teacher. Inspired by Collenbergs (2020) model of intercultural Lehrkompetenz in three interconnected components and the pluricultural competence aspect of the CEFR Companion Volume (Council of Europe, 2020), it encompasses domain knowledge about cultural differences and their implications for teaching, practical skills in designing, leading and reflectively evaluating culturesensitive and intercultural language classes, and, critical for this argument, reflexive attitudes to one's cultural background as a DaF teacher, the biases which AI might unwittingly perpetuate and the irreducibly human aspect of intercultural encounters, communication and language learning, which are considered the deeper educational purposes of FL instruction.

The four domains are non-hierarchical and aren't arranged sequentially in order of professional development, but interact on an interdependent basis. An AI-competent FL teacher will draw upon and combine skills and knowledge from all four domains in a principled and integrated fashion. The teacher possessing only extensive disciplinary pedagogical knowledge will be incompetent to support students struggling in an AI-enabled world outside the classroom and gradually increasingly inside it as well. The technically AI-proficient teacher lacking intercultural reflexive competency might use AI tools in ways that unconsciously rely on common stereotypes or prioritize the language practices that are dominant in the target culture and thus miss the educational opportunities offered by genuine intercultural interaction. The truly AI-competent FL teacher as defined in this article successfully integrates and applies all four domains reflectively, holistically and in tandem, this teacher doesn't so much benefit from technology to supplement their established roles, but rather offers a new perspective

on FL instruction and practice as a profession by responding dynamically to new technological possibilities within the limits and aims of humanistic education.

Conclusion: Implications for DaF Teacher Education and Future Research

I presented a theoretical model here intended to facilitate a structured reconceptualization of FL teacher competency in a context characterized by the rapidly accelerating development and increasingly widespread educational adoption of AI. Through drawing on structural competence theory, research in digital and technological competencies, insights from TPACK studies and extensions thereof into AI environments, understanding of AI's impact on FL teaching, relevant AI competency frameworks being developed for educators and the intercultural components of DaF professional identity, I proposed a Four-Domain Model of the AI-competent FL teacher. The aim of this model is to frame the AI-competent FL teacher not as an AI-augmented extension of the standard language teacher but as a reconceptualized language teaching professional of different quality.

For DaF teacher education, the model developed in this chapter thus offers several concrete institutional implications. Initial teacher education curricula have to transition from the offering of digital literacy training as an optional component or supplementary module and instead offer AI literacy training, critical engagement with AI and education in AI ethics as core requirements of teacher professional education. Furthermore, the methods courses offered in DaF pedagogy curricula have to be redesigned to respond to the challenge that AI will be generating target-language material, will provide practice environments in which communication between users occurs under AI facilitation and will also reconfigure what constitutes the use of a "real language use situation" in AI environments for learners. Practicum and field components within initial teacher education must offer the opportunity for structured exploration and critically reflective practice with AI tools in real DaF classroom settings for student teachers. For practicing DaF teachers, continued professional development will need to include ongoing, supported opportunities to engage critically with continually emerging AI tools based on pedagogically meaningful and ethically sound frameworks instead of simply keeping up with technological trends.

There are several major gaps in current FL teacher AI competence scholarship that urgently need addressing. FL-specific, evidence-based studies of teacher AI competence are lacking. These are required to ascertain what knowledge DaF teachers possess of AI tools, how they evaluate them and use them in their classroom and what type of professional development support fosters critically developed teacher AI competence. Studies based on longitudinal research designs are required to track changes in FL teacher AI competence throughout teachers' careers, from their initial teacher education to their senior professional roles. Research comparing the ways teachers of different foreign languages in various countries and institutions work with AI to grasp the shared challenges and opportunities of its integration will be valuable in discerning patterns that are universally applicable from those unique to a specific context. And most pressingly to realize FL teachers' professional identity in the way I reconceptualized it in this chapter, studies on the learner perspective on AI-mediated FL learning are required. These are needed to understand how learners engage with AI tools and react to them, what observable effects AI integration has on the learners' communicative and intercultural development and

how teacher competencies influence the quality of AI-mediated FL learning experiences and their educational benefit.

AI's arrival in FL teaching represents neither a professional crisis requiring defensive management nor a technological utopia calling for uncritical adoption, rather, it's an intellectually and professionally taxing but otherwise very generative invitation to reevaluate and communicate with new precision and, through deliberate professional development, enrich the uniquely human elements that characterize language teaching at a time that simultaneously challenges and confirms these elements' inestimable educational value.

REFERENCES

- Basilotta-Gómez-Pablos, V., Matarranz, M., Casado-Aranda, L. A., & Otto, A. (2022). Teachers' digital competencies in higher education: A bibliometric analysis. *International Journal of Educational Technology in Higher Education*, 19(1), 8. <https://doi.org/10.1186/s41239-021-00312-8>
- Celik, I. (2023). Towards Intelligent-TPACK: An empirical study on teachers' professional knowledge to ethically integrate artificial intelligence (AI)-based tools into education. *Computers in Human Behavior*, 141, 107220. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2022.107468>
- Collenberg, M. (2020). Förderung interkultureller Lehrkompetenz: Didaktische Gestaltungsprinzipien für die Lehrerbildung. Springer VS. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-28689-7>
- Council of Europe. (2020). Common European Framework of Reference for Languages: Learning, Teaching, Assessment. Companion Volume. Council of Europe Publishing. <https://www.coe.int/en/web/common-european-framework-reference-languages>
- Crompton, H., & Burke, D. (2023). Artificial intelligence in higher education: The state of the field. *International Journal of Educational Technology in Higher Education*, 20(1), 22. <https://doi.org/10.1186/s41239-023-00392-8>
- European Commission. (2022). Digital Education Action Plan 2021–2027. Publications Office of the European Union. <https://education.ec.europa.eu/focus-topics/digital-education/action-plan>
- Falloon, G. (2020). From digital literacy to digital competence: The teacher digital competency (TDC) framework. *Educational Technology Research and Development*, 68(5), 2449–2472. <https://doi.org/10.1007/s11423-020-09767-4>

Godwin-Jones, R. (2022). Partnering with AI: Intelligent writing assistance and instructed language learning. *Language Learning & Technology*, 26(2), 1–20.

Holmes, W., & Tuomi, I. (2022). State of the art and practice in AI in education. *European Journal of Education*, 57(4), 542–570. <https://doi.org/10.1111/ejed.12533>

Jeon, J., & Lee, S. (2023). Large language models in education: A focus on the complementary relationship between human teachers and ChatGPT. *Education and Information Technologies*, 28(12), 15873–15892. <https://doi.org/10.1007/s10639-023-11834-1>

Kasneci, E., Seßler, K., Küchemann, S., Bannert, M., Dementieva, D., Fischer, F., Gasser, U., Groh, G., Günnemann, S., Hüllermeier, E., Krusche, S., Kutyniok, G., Michaeli, T., Nerdel, C., Pfeffer, J., Poquet, O., Sailer, M., Schmidt, A., Seidel, T., ... Kasneci, G. (2023). ChatGPT for good? On opportunities and challenges of large language models for education. *Learning and Individual Differences*, 103, 102274. <https://doi.org/10.1016/j.lindif.2023.102274>

Kultusministerkonferenz (KMK). (2021). *Lehren und Lernen in der digitalen Welt: Die ergänzende Empfehlung zur Strategie "Bildung in der digitalen Welt."* KMK. https://www.kmk.org/fileadmin/veroeffentlichungen_beschluesse/2021/2021_12_09-Lehren-und-Lernen-Digi.pdf

UNESCO. (2023). *Guidance for generative AI in education and research*. UNESCO Publishing. <https://doi.org/10.54675/SDPP0253>

Beyond Clocks and Classrooms: Artificial Intelligence, Robotic Automation, and the Reconfiguration of Work and Education

Bora BAŞARAN¹

¹bbasaran@anadolu.edu.tr; Anadolu Üniversitesi, Eğitim Fakültesi Fakültesi, Yabancı Diller Bölümü, Eskişehir/ Türkiye.

Özet

Bu çalışma, yapay zekâ ve robotik teknolojilerin okulların ve ücretli emeğin ortadan kalkmasına yol açacağı yönündeki radikal tezi eleştirel bir bakış açısıyla incelemektedir. Çalışma, bu iddianın ideolojik olarak yüklü ve ampirik olarak belirsiz olduğunu savunarak, mevcut kanıtlar, teorik olasılıklar ve spekülasyon varsayımları arasında ayrım yapmayı amaçlamaktadır. Bu kapsamda, otomasyonun iş gücü piyasaları üzerindeki etkileri görev-temelli ekonomik analiz çerçevesinde değerlendirilmekte; yapay zekâ destekli kişiselleştirilmiş eğitimin potansiyeli ve sınırları tartışılmaktadır. Ayrıca, otomatik bolluk toplumu fikri, uzmanlar arasındaki zamanlama konusundaki görüş ayrılıkları ve ortaya çıkan yönetim sorunları analiz edilmektedir. Çalışma, bu dönüşümlerin kaçınılmaz olmadığını, aksine teknolojik gelişmelerin etkilerinin toplumsal, politik ve kurumsal tercihlere bağlı olarak şekilleneceğini ileri sürmektedir.

Anahtar Kelimeler: Yapay zekâ, Otomasyon, Eğitim, İşgücü piyasası, Teknolojik değişim

Abstract

This study critically examines the radical thesis that artificial intelligence and robotic technologies will render schools and waged labour obsolete. It argues that this claim is both ideologically loaded and empirically uncertain, aiming to distinguish between established evidence, theoretical plausibilities, and speculative assumptions. Within this framework, the effects of automation on labour markets are analyzed through a task-based economic perspective, while the potential and limitations of AI-driven personalized education are explored. The study also addresses the notion of an automated abundance society, expert disagreements regarding timelines, and emerging governance challenges. It concludes that these transformations are not inevitable; rather, the societal impact of technological advancements will be shaped by social, political, and institutional choices.

Keywords: Artificial intelligence, Automation, Education, Labour market, Technological change

INTRODUCTION

No argument in the contemporary realm of ideas is more ideologically loaded and more empirically uncertain than the claim that artificial intelligence and robotics will make schools and waged labour redundant. In its most extreme formulation, the thesis holds that as machine learning algorithms

perform at or above the human level in a continually increasing number of cognitive and physical activities and as robots automate the embodied tasks previously performed by wage workers, the two principal reasons for sending young people to school (developing job skills) and forcing the majority to show up to a job each morning (earning wages necessary to survive) will simply vanish. Replaced by personally tailored AI tutorials and automated wealth generation and distribution, both the compulsory alarm clock and the standard school curriculum would be relegated to the dustbin of history as the vestiges of a superseded economic regime.

In this chapter, I undertake a sustained critical investigation of this radical thesis. This undertaking isn't designed to discount the immense promise of the new technologies, many of the implications of which are evident from the review of literature presented in later sections of the chapter. Instead, my aim is to provide an accurate and well-calibrated framework in which to place these technologies by distinguishing what has been established empirically, what's theoretically plausible and what amounts to mere speculation, even among some of the most authoritative voices in the field. This chapter is structured as follows. Section 2 sets out and briefly situates the modern wave of automation. Section 3 summarizes the current literature on the potential for this wave of automation to disrupt the labor market using concepts from task-based economic analysis. Section 4 examines empirical studies on AI-guided personalized education and debates the extent to which it really poses a threat to the modern educational establishment. Section 5 probes the concept of an automatically abundant society and some key social and political conditions that'd have to be met if such a society were ever to come into existence. Section 6 addresses the deep disagreement among experts over the timeline on which widespread technological unemployment might eventually occur and also touches upon important uncertainties regarding technological limits and the ultimate capacity of AI. Section 7 examines the potential for a range of policy and governance challenges to emerge and some important political questions and structural preconditions relevant to the idea of a society no longer defined by wage work. Section 8 offers concluding remarks.

In brief, my argument is that the technologies and associated social changes hypothesized in the opening thesis are far from far-fetched and aren't (even remotely) an immediate or unavoidable threat in the way proponents often represent them. They depend heavily on social, political and institutional choices over which debate continues and remains intense. Already, their effects are unequal: they already disproportionately affect workers of different genders, racial and ethnic groups and geographic origins. As argued in the final sections of this chapter, their long-run trajectory hinges as much on which conception of the good society prevails in democratic debate as it does on engineering feats. The technology itself doesn't fix our future, instead, it represents a profoundly new set of powerful instruments whose use and impact will be determined, no less than by the science that made it, by the choices that we make as a society.

2. The Technological Wave: Situating the Contemporary Moment

2.1 From Mechanical to Cognitive Automation

Automation isn't new. The Industrial Revolution of the 19th century relied on mechanisation (specifically, power looms), substituting capital for labour in tasks ranging from textiles manufacturing to smelting. In the latter half of the 20th century, numerically-controlled machinery machines enabled

the automation of machine tools. The economic impacts of these earlier forms of automation proved at once creative and destructive. Mokyr (1990) wrote of the Luddite rebellions, a labour-related protest in early 19th century England concerning new machinery and the way in which the machines replaced craftsmen. A review in 2008 by Goldin and Katz referred to a historical correlation between a greater proportion of the American labour force engaged in routine skills and a decrease in their annual real wages.

Automation differs from prior technological advances both in the share of a specific task that it's possible to automate and in its cognitive domain. Generative AI (in particular, large language models [LLMs]) can ideate, create new forms of content, conduct deep-level problem-solving and evaluation and possess deep natural language understanding that only 10 years ago was expected to lie 25, 50 years in the future (Acemoglu &, Restrepo, 2024). On 30 November 2022, OpenAI released ChatGPT, an LLM-powered chatbot. In less than two months of launch, ChatGPT acquired 100 million active monthly users, making it the most successful and rapid platform deployment in history (Acemoglu, 2024). Two years after ChatGPT's launch, investment in generative AI more than sevenfold surpassed its initial figures (World Economic Forum, 2025). These statistics led mainstream economic analysis to revisit assumptions concerning automation's aggregate employment effects and scope. In April 2025, Hampole et al. found that adoption of AI in the period through May 2023 produced negligible changes in overall employment as automation focused on those tasks which left individuals more leeway to shift to related complementary activities. The task of shifting to other, more complex, tasks has been described as a process of task displacement that helps to create an economy with few jobs remaining open at the same skills and wage levels of those whose jobs were replaced, the authors refer to this trend as a race between invention and imitation.

2.2 Robotics and Physical Automation

In parallel with developments in artificial intelligence, industrial robots have begun to invade industries and services on a scale unprecedented. Indeed, the average density of robots worldwide, the ratio of industrial robots to the ten thousand people in a given industry; has more than doubled in the seven years to 2025 and is expected to make a substantial impact on many economies, even at its current levels (World Economic Forum, 2025). Developed nations expect robots to be responsible for a lot of disruption of how firms do business, but this isn't so for the countries in Sub-Saharan Africa and the Middle East and North Africa, which are anticipating much lower impacts, as capital is scarce, infrastructure is poor and wages are much lower. The result is a form of automation which isn't a global wave but rather something localized geographically, so any model which posits a universal post-work abundance is misleading.

3. Labour Markets in Flux: Displacement, Complementarity, and the Task Paradigm

3.1 The Task-Based Framework

The primary theoretical lens that scholars utilize to interpret the effects of automation on labor markets is the task-based model pioneered in a series of papers by Daron Acemoglu and his collaborators (e.g., Acemoglu &, Restrepo, 2017). This approach views automation not as a blunt augmentation or substitute for general labor but instead as a machine-based productivity boost that takes the form of

doing the tasks performed by labor, specifically, of carrying out at least some, but not all, of the individual tasks performed by various types of labor and by capital. When machines become better at performing these tasks, workers are pushed out of those tasks in which they were relatively more efficient (e.g., manual assembly). The key prediction of the task-based model is thus: groups that experience a large number of automated tasks see their real wage fall relative to groups that don't (Acemoglu & Restrepo, 2022). According to their 2022 work; which analyzes the deployment of three kinds of automation, industrial robots, specialized machinery for particular processes and dedicated machinery, throughout all U.S. industries from 1980 to 2016, 50, 70% of changes in the U.S. wage distribution over the 1980s, 1990s and 2000s resulted from relative wage declines for groups concentrating on routinizable tasks, jobs susceptible to the spread of rapid technological change and automation.

There are two reasons to focus on this particular finding. First, it shows, at least in terms of evidence from the U.S., that the distributional consequences of technology are large and unequal. Second, it offers an important theoretical contribution, as the framework clearly separates Automation (capital replacing labor in specific tasks) from the creation of new tasks (capital helping labor to carry out new tasks) and distinguishes it from skill-biased technological change, that doesn't inherently displace any given worker from any job. The authors argue that the net macroeconomic consequences of Automation depend on the balance between task displacement and new task creation. When Automation outpaces new task creation, it causes sharp declines in the labor share and stagnates wages, when new task creation rises more quickly than the rate of displacement, Automation has coincided with periods of rising wages and full employment (Acemoglu & Restrepo, 2024).

Table 1. *Mechanisms of AI Impact on Labour Markets*

Mechanism	Description	Empirical Evidence	Outcome
Task Displacement	AI replaces routine tasks	Acemoglu & Restrepo	Wage decline
Complementarity	AI augments human work	MIT–HBS studies	Job transformation
New Task Creation	Emergence of new roles	WEF 2025	Employment growth
Inequality Effects	Uneven distribution	Gender & entry-level data	Polarization

3.2 Generative AI and Shifting Patterns

Task-based frameworks expect generative AI to have uniquely disruptive effects by entering cognitive and creative tasks that were previously not considered routine and hence resistant to automation. An early comprehensive study on the nature and extent of AI task exposure from 2010, 2023 that surveyed nearly all 24,000 job titles recognized by the United States Department of Labor, coauthored by MIT Sloan, Yale and Northwestern's Kellogg School of Management, found that when AI can automate most of the tasks of a job, the fraction of employees with that occupation in a firm declines by 14.3 percent. But when only some tasks of a particular role can be automated by AI, the share of employment can rise for that role because employees are motivated to perform tasks complementary to AI. A job that can be automated less, whether due to being a higher-skilled task, a softer skill, or a component within a particular task that AI still struggles with; may therefore still be

susceptible to decline or, in some cases, even grow because it now only consists of complementary tasks, thereby offering employees an opportunity to automate more easily what they consider boring tasks.

The World Economic Forum's Future of Jobs Report 2025 is the most authoritative medium-term projection of labor market trends and skills demand. This report collected data from more than 1,000 large employers across 22 industries and 55 economies and analyzed a labor market that represented more than 14 million workers. From 2025 to 2030, the report projects that job creation and job destruction resulting from structural transformations to be equivalent to 22 percent of total employment. The report predicts 170 million new jobs to be created and 92 million to be displaced in the next five years. The result is an employment increase of 78 million people (225 - 133). AI and data processing will be responsible for the creation of 11 million roles, whereas 9 million roles will be eliminated. Robots and automation, meanwhile, are projected to displace 5 million more jobs than they create, disproportionately affecting jobs in clerical and administrative support roles, with cashiers, ticket clerks, administrative assistants and accountants experiencing the steepest projected declines.

Short-term, generative AI is found to be concurrently both job displacing and job-augmenting across different occupations in the U.S. Labor Market. Srinivasan, Chen and Zakerinia (2024) found that for occupations susceptible to automation, jobs call for significantly fewer unique skills (7 percent fewer skills in our sample). At the same time, jobs that have high potential for AI augmentation see increased skill diversity, such as in demand for AI literacy, human-AI collaboration and specialized AI applications for the job domain. The researchers recommend that organizations see generative AI as an augmentation tool instead of just a cost-reduction tool. Companies should develop their workforce with plans for occupational transition and changing skill requirements to ensure an adaptation for employees as well as for businesses.

3.3 The Inequality Dimension

AI isn't evenly distributed across the economy and it does not affect everyone neutrally. women are disproportionately represented in occupations at high risk of AI automation: some figures indicate 79% of employed women in the US hold jobs with high automation exposure compared to 58% of men. this is because women work in many clerical roles, administrative and routine service industries where automation is likely more prevalent. Entry-level jobs are especially at risk, typically taken by the young to get a foothold and develop an upward career path. As evidence of these trends appearing pre, large-scale adoption of generative AI, LinkedIn career data shows that 2021, 2023 graduates had lower career start rates and took longer to secure initial jobs than earlier graduate classes. As Acemoglu (2024) remarks, "We're not sure exactly how the effects of AI will shake out in the wage and inequality dimension. However, according to the task-based approach, in the absence of the creation of enough new tasks to offset automation, a large-scale automation of existing tasks is going to exert downward pressure on labour shares for workers highly concentrated in the tasks they perform."

4. Education Reimagined: AI-Driven Personalised Learning and the Institutional Architecture of Schooling

4.1 The Pedagogical Case for Personalisation

"The criticism of institutional mass education is predicated on the empirical observation that uniform, centrally coordinated education at a universal pace fails to adequately teach both the brightest and the slowest students, creates the famous 2-sigma problem reported by Bloom (1984), in which tutored students perform at a higher level than approximately 98 percent of all other students in a traditional classroom and ultimately rewards credentialism rather than deep knowledge or competence creation. The promise of artificial intelligence tutoring at scale is to resolve the problems in the classroom at scale by using adaptive, ongoing monitoring of individual student knowledge states, preferences and learning paces to modulate instructional content difficulty, format and sequence as well as to create learning feedback that traditional classroom teaching can't deliver at the same scale and granular level." (WEF, 2024).

The systematic literature review conducted in the field of artificial intelligence-based personalised learning for 2015, 2025 included 157 peer-reviewed journals, 239 peer-reviewed conference proceedings, 31 patents and 1 book edited in the domain. An increasing number of scientific papers on artificial intelligence in education and a particularly rapid exponential increase in publications were noted from 2023 to 2024, due to rapid advancements in generative artificial intelligence. This review confirms that adaptive learning platforms driven by algorithms are able to monitor student performance in real-time to pinpoint specific weaknesses and strengths and adjust their teaching methodology to fit each learner. An accompanying systematic review of AI in education, incorporating 155 peer-reviewed empirical studies (2015; 2025), reports that, among benefits: (i) enhanced learning outcomes for students, (ii) a higher degree of student motivation and engagement and (iii) extended learner autonomy were the three most frequently observed benefits, while it also notes significant challenges and considerations associated with the widespread implementation of AI in education, including issues of digital dependency, data protection and privacy ethics and the potential for exacerbating digital divide and access issues among diverse learner populations (Garzón et al., 2025).

A third systematic literature review, focused solely on personalised learning paths for lifelong learning purposes and including 78 peer-reviewed studies published in Scopus and Web of Science between 2019 and 2024, corroborates that personalised learning paths powered by AI are feasible in various media contexts (e.g., mobile learning environments, educational games, MOOCs and AR). Nevertheless, it highlights that the democratization of personalised learning pathways continues to be uneven, with most developments being concentrated in a small number of developed countries, chiefly China, the United States and India. This uneven capacity development poses a serious risk of perpetuating inequalities and disadvantaging students in developing countries that lack the requisite educational technological infrastructure to tap into the advantages of personalised learning (Bayly-Castaneda et al., 2024).

Table 2. *AI in Education: Opportunities and Risks*

Dimension	Benefits	Risks
Learning	Personalization, higher outcomes	Over-reliance
Motivation	Increased engagement	Reduced autonomy
Access	Scalable tutoring	Digital divide
Ethics	Data-driven insights	Privacy & bias

4.2 Policy and Institutional Responses

In late 2023, the Department of Education issued a policy document acknowledging that "Artificial intelligence has the potential to help achieve many of our country's educational priorities with greater effectiveness, at a larger scale and at a lower cost than any other available or emergent institutional arrangement" but "AI also presents substantial risks that we must proactively address through active governance" and listing among these risks "The equity gap problem," "Algorithmic bias in student-facing tools," and the "EROSION OF STUDENT-TEACHER RELATIONSHIPS. In a similar way to many of the arguments outlined, the UNESCO 2023 Global Education Monitoring report, titled technology in education, argued that "ICT can enable personalized learning centered on learners' interests and strengths," but only if such personalized learning centers be approached with consideration for the "conditions under which ICT is used and the purposes it serves." In higher education institutions across the United States by November 2023, more than half of students reported having used some kind of artificial intelligence tool for an academic assignment. Almost two thirds of these students do so, without the instructor finding out. However, although some institutions like Davidson College (NC) have published an AI ethics guidelines paper to assist instructors, others have responded with a total or partial ban of AI, for example, Sciences Po in Paris (France) and (early October) the New York City Department of Education.

4.3 Limits of the Obsolescence Thesis

To claim that AI personalization renders schools obsolete requires confusing the two arguments with one another. First, that AI improves the quality and efficiency of teaching in concert with, or even within, schools, the data support this. Second, that AI could completely replace schools, so there would be no need for mandatory school. The evidence currently doesn't support this second claim and significant contrary arguments can be made to it. Schools not merely transmit information. They provide the settings for social development and practice that foster interpersonal skills, good civic habits and resilience. They take on the crucial functions of childcare and welfare for children of parents in the workforce. And they act as important vehicles of social integration and the nurturing of democratic social values. No AI can do these things right now, nor are any on the near-term development horizon. Substituting AI tutors for schools in place of formal institutions therefore appears to remain a projection without an evidence basis for the moment.

5. The Spectre of Automated Abundance: Post-Scarcity Imaginaries and Political Economy

The most compelling visions of automation's long-run obsolescence of labor assume a world of abundance, a situation in which artificial intelligence and robotic systems possess sufficient capabilities to produce an output vast enough that no one need work in order to live well. This vision is at least as old as Keynes's 1930 article, "Economic Possibilities for Our Grandchildren." Keynes predicted that technological progress would allow us to satisfy all of our material needs and comforts within a century by working no more than fifteen hours a week, leaving the remainder of our lives for the enjoyment of leisure and the pursuit of arts and intellectual interests (Keynes, 1930). Keynes proved systematically overoptimistic: not because progress stagnated, but because societal and political arrangements ensured that the fruits of technological advances would be concentrated primarily in higher consumption rather than in less working time. Modern discussions about an abundance world of automated labor take more

of the analytical possibilities of what we've just called AI seriously. One Yale economist, Pascual Restrepo, is beginning to investigate the maximum extent of that possibility in which humans end up providing no value whatsoever, AI can do absolutely anything people can, but better. Restrepo published in a paper titled "We'll not Be Missed: Work and Growth in the AGI World" where AGI is modeled as "superhuman" systems which perform tasks much better than the best human workers across the whole economy, such as medical, creative, engineering, or other highly skilled services (Yale Department of Economics, 2025). Restrepo and his coauthors offer this extreme extrapolation as "a clear reference point for discussing the implications of potential advances," but they stress that it's "a world far in the future, contingent on the advent of AGI, the nature of which remains highly speculative." As Acemoglu (2024) cautions: "Some experts believe that AGI, a sufficiently general form of AI, could be just around the corner... other experts disagree significantly... Predicting AI's impact on the macroeconomy hinges on a number of speculative assumptions, making any firm predictions highly tentative." Even if one takes the long-run technical possibility of abundant automated material production as given, the questions it poses are, first and foremost, political and economic ones. Automation generates value and this value must be owned and distributed by some form of social, political and economic institutions. Today, the benefits of capital-intensive automation flow disproportionately to owners of capital (as indicated by a growing share of profits going to companies and shareholders) Acemoglu & Restrepo, 2024, Restrepo, 2025. For the benefits of automated production to create a post-work world of abundance for everyone, one needs more than the technical means of automation, one needs new arrangements of ownership over means of production or new fiscal institutions that socialize the returns to automated production at scale. These are crucial prerequisites of the first order, which must be met by political choices, not by technology itself. Their implementation would represent a far more significant break with current institutions than automation itself.

6. Contested Timelines and Epistemic Uncertainty: The Expert Debate

One of the most striking features of the scholarly and technical literature on the societal implications of advanced AI is the lack of agreement among experts whose academic credentials and serious intent are impeccable. For example, several prominent AI researchers at frontier organizations maintain that artificial general intelligence (AGI), machines that possess a broad range of intellectual capacities comparable to a human; may be decades away or even fundamentally unattainable with current approaches, or a mere ten years away or less, in the view of others. To stress, this is a dispute between experts: each perspective is well-supported with theoretical arguments and empirical interpretation that both share.

In mainstream economics, a principled defense of the epistemic state is furnished by Acemoglu (2024). Using tools that economists frequently employ, which include task-based modeling frameworks and estimates based on automation's impact over history, he contends that even optimistically envisioning the progress of technology, the macroeconomic ramifications in ten years or so are much less dramatic than many popular accounts assert. The two main reasons are that (1) the fraction of jobs technically amenable to automation by today's AI technologies that are also profitable to automate, accounting for installation, quality inspection and organizational change expenses, is a lot lower than the automation exposure measures commonly cited suggest and (2) the aggregate effects of AI automation on growth, wages and employment depend not only on the boost in productivity brought

about by replacing tasks with AI but also on whether these gains are reinvested in new labor-intensive tasks, the extent to which monopolies or quasi-monopolies can capture the rent generated by AI technologies and whether social welfare (as distinct from market GDP) accurately reflects improvements brought about by AI technologies (Acemoglu, 2024). Goldman Sachs published projections in 2023 of AI contributing seven percent to the growth of the global gross domestic product, equivalent to roughly \$7 trillion. This estimate offers more-optimistic central assumptions than most, yet these assumptions require the validity of currently unknown or speculative claims to hold true, according to Acemoglu.

A report in 2024 by the McKinsey Global Institute titled "Jobs in Europe: The future of work in Europe and beyond" described generative AI and similar automation technologies as capable of automating work activities performed by seventy percent of workers in the European Union, assuming they're applied as widely as technically possible. This estimate signifies what's technically possible but not, however, what is organizationally and economically feasible. Automation adoption requires significant capital investment, costly organizational re-engineering, regulatory scrutiny and training for the workforce, changes that historically occur much more slowly than technological progress alone. In its Future of Jobs Report 2025, the World Economic Forum acknowledged the disparity between what's technologically possible and the disruption that actually occurs when reporting its figures conditional: they express what employers expect, but not necessarily what will inevitably materialize.

The issue of timelines is significant not merely on a purely academic level but because of its policy consequences. If a level of automation is a decade off, the impetus to adjust social insurance schemes, update school curricula and establish more robust systems of wealth and income distribution is considerably greater than if it lies fifty years in the future or may perhaps never arise in the form envisioned now. Navigating through such deep uncertainty, or even considerable ignorance, should motivate the establishment of agile systems of governance; ways of governing that are flexibly designed to accommodate the changes and new information as they arise rather than assuming a certain best- or worst-case future beforehand (Acemoglu, 2024).

7. Governance, Equity, and the Structural Prerequisites of Beneficial Transition

Workforce and reskilling, algorithmic governance and economic distribution all contribute to how AI automation distributes gains and costs, potentially either making the future broadly beneficial or incredibly destructive. The first, workforce investment and reskilling, is being attempted through AI-driven adaptive learning, which promises to help close the gap between intention and access. However, employers are only considering upskilling as their first option at 85% and only 77% consider reskilling to increase collaboration with AI systems between 2025 and 2030, while those workers facing the greatest risk of automation are those in routine, low-to-middle-wage jobs, who are the least likely to have retraining sponsored by an employer and rely most heavily on often chronically underfunded public workforce development systems (World Economic Forum 2025). The second, algorithmic governance and the ethics of AI in education, sees AI as increasingly involved in student feedback, learning pathways and assessment. Without ethical and policy frameworks designed to protect students, the World Economic Forum (2023), in the GEM Report, argues that many educational AI tools will only benefit students from well-resourced backgrounds at the expense of other students due to access and digital literacy gaps. The U.S. Department of Education (2023) stresses that ethical, policy-driven

oversight, protecting privacy, ensuring equity and maintaining meaningful human control, must accompany any deployment of AI into education. The third is economic distribution. In automated abundance, the key questions will be who will own the capital assets that produce abundance. When machines carry out tasks on which people earn above-market wages, these gains disappear. The U.S. Department of Education (2023) stresses that, unless governments enact the policies needed to redirect some of AI's or robots' efficiency gains toward those displaced by them, including with progressive tax schemes, sovereign wealth funds, enhanced public services, or UBI, automation will benefit the wealthy population and leave the poor to face stagnation, erosion of careers and economic insecurity. The United States isn't at a point of automated abundance as a technical reality. The United States will reach that point, however, only through specific political choices that can only be made through votes, not in algorithms (Acemoglu and Restrepo 2024).

8. Conclusion: Navigating an Open Future

The chapter has argued that the premise on which it opened; that advances in AI and robotics are coming, that they're such that they would abolish schooling as we know it, render many kinds of work jobs irrelevant and make being woken up at specific times and following strict learning schedules obsolete due to AI-tutor-personalized education and automated abundance, rests on the shoulders of a mixture of empirically supported trends in the immediate future and speculative long-term projections, whose timetables and conditions of possibility are poorly understood and subject to radical debate among knowledgeable specialists.

The empirically supported evidence is still extensive. We can see automation is reshaping the economy, the composition of jobs, wage distribution, skill demands in ways that are hurting low-skill, routine workers, newcomers to the workforce, women and populations in less economically developed parts of the world. And AI-mediated personalized learning improves learning outcomes for the students subjected to it, who learn more effectively when they're taught with AI and could potentially give many access to the excellent education that a good human teacher might provide who is currently out of reach. These are genuine issues that policymakers should be taking seriously.

But the speculative elements should be treated with constant humility. The replacement of the institution of schooling by an AI tutor and of waged work by automated abundance, would both need technical advancements, cultural and social-political innovations beyond the level that current data indicate will become available in the foreseeable future. The institutions of compulsory schooling and organized labor weren't born randomly. They've important functions that go beyond simple technology. These functions are social, cognitive, developmental, political and distributive. Whether these coming advances serve to liberate us or destroy us will depend on the particular social-political innovations and distributed governance systems that democracies chose to install around them, rather than simply on the nature of algorithms themselves. the future is genuinely open and it's the role of hardheaded social science to make us better able to recognize whether and under what conditions that openness is well or badly managed, rather than prematurely to open it up as fully utopian or fully dystopian.

REFERENCES

- Acemoglu, D. (2024). The simple macroeconomics of AI. NBER Working Paper No. 32487. National Bureau of Economic Research. <https://doi.org/10.3386/w32487>
- Acemoglu, D., & Restrepo, P. (2022). Tasks, automation, and the rise in U.S. wage inequality. *Econometrica*, 90(5), 1973–2016. <https://doi.org/10.3982/ECTA19815>
- Acemoglu, D., & Restrepo, P. (2024). A task-based approach to inequality. *Oxford Open Economics*, 3(Supplement 1), i906–i929. <https://doi.org/10.1093/ooec/odad082>
- Bayly-Castaneda, K., Ramirez-Montoya, M.-S., & Morita-Alexander, A. (2024). Crafting personalized learning paths with AI for lifelong learning: A systematic literature review. *Frontiers in Education*, 9, Article 1424386. <https://doi.org/10.3389/educ.2024.1424386>
- Dumbuya, E. (2025). The quiet transformation of higher education in the AI era. *PubMed Central*. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12438950/>
- Farhood, H., Nyden, M., Beheshti, A., & Muller, S. (2025). Artificial intelligence-based personalised learning in education: a systematic literature review. *Discover Artificial Intelligence*, 5(1). <https://doi.org/10.1007/s44163-025-00598-x>
- Garzón, J., Patiño, E., & Marulanda, C. (2025). Systematic Review of Artificial Intelligence in Education: Trends, Benefits, and Challenges. *Multimodal Technologies and Interaction*, 9(8), 84. <https://doi.org/10.3390/mti9080084>
- Hampole, M., Papanikolaou, D., Schmidt, L., & Seegmiller, B. (2025). Artificial Intelligence and the Labor Market. Elsevier BV. <https://doi.org/10.2139/ssrn.5121025>
- McKinsey Global Institute. (2023). Generative AI and the future of work in America. McKinsey & Company. <https://www.mckinsey.com/mgi/our-research/generative-ai-and-the-future-of-work-in-america>
- McKinsey Global Institute. (2024). A new future of work: The race to deploy AI and raise skills in Europe and beyond. McKinsey & Company. <https://www.mckinsey.com/mgi/our-research/a-new-future-of-work-the-race-to-deploy-ai-and-raise-skills-in-europe-and-beyond>
- Srinivasan, S., Chen, W. X., & Zakerinia, S. (2024). Displacement or complementarity? The labor market impact of generative AI (HBS Working Paper). Harvard Business School. <https://www.library.hbs.edu/working-knowledge/enhance-or-eliminate-how-ai-will-likely-change-these-jobs>
- Strielkowski, W., Grebennikova, V., Lisovskiy, A., Rakhimova, G., & Vasileva, T. (2024). AI-driven adaptive learning for sustainable educational transformation. *Sustainable Development*, 33, 1921–1947. <https://doi.org/10.1002/sd.3221>

UNESCO. (2023). Global education monitoring report 2023: Technology in education – A tool on whose terms? UNESCO Publishing. <https://doi.org/10.54676/UZQV8501>

U.S. Department of Education. (2023). Artificial intelligence and the future of teaching and learning: Insights and recommendations. Office of Educational Technology. <https://www.ed.gov/sites/ed/files/documents/ai-report/ai-report.pdf>

World Economic Forum. (2024). The future of learning: AI is revolutionizing education 4.0. <https://www.weforum.org/stories/2024/04/future-learning-ai-revolutionizing-education-4-0/>

World Economic Forum. (2025). The future of jobs report 2025. World Economic Forum. <https://www.weforum.org/publications/the-future-of-jobs-report-2025/>

Yale Department of Economics. (2025). Pascual Restrepo on AI, automation, and the future of work. <https://economics.yale.edu/news/260317/pascual-restrepo-ai-automation-and-future-work>

Kripto Para: Yatırımcılık mı, Karanlık Kişilik mi?¹

Nisanur AK², Turgut TÜRKDOĞAN³

²E-mail: nak22@posta.pau.edu.tr; Pamukkale Üniversitesi, Eğitim Fakültesi,
Eğitim Bilimleri Bölümü, Psikolojik Danışma ve Rehberlik Lisans Programı, Denizli/ Türkiye.

³E-mail: turkdogan@pau.edu.tr; <https://orcid.org/0000-0001-5440-341X>; Pamukkale Üniversitesi,
Eğitim Fakültesi, Eğitim Bilimleri Bölümü, Psikolojik Danışma ve Rehberlik Anabilim Dalı,
Denizli/ Türkiye

Özet

Bu araştırmanın amacı, bireylerin kripto para borsalarına yönelik ilgi ve bilgi düzeyleri ile karanlık kişilik özellikleri arasındaki ilişkiyi incelemektir. Araştırmanın örneklemini, 18 ile 64 yaş arasında değişen 430 yetişkin oluşturmaktadır. Veriler, Demografik Bilgi Formu, Kripto Varlık Yatırımcıları Algı Düzeyi Anketi ve Karanlık Dörtlü Ölçeği kullanılarak toplanmıştır. Verilerin analizinde betimsel istatistikler, Pearson korelasyon analizi, bağımsız örneklemeler için t testi ve tek yönlü varyans analizi (ANOVA) kullanılmıştır. Bulgular, kripto para borsalarına yönelik ilgi ve bilgi düzeyi arttıkça Karanlık Dörtlü toplam puanlarının da arttığını göstermiştir. Ayrıca, kripto para borsalarına yönelik daha olumlu tutumlara sahip katılımcıların, daha az olumlu tutumlara sahip olanlara kıyasla karanlık kişilik özellikleri bakımından anlamlı biçimde daha yüksek puanlar aldığı belirlenmiştir. Bu bulgular, kripto para borsalarıyla ilişkili yönelimin yalnızca ekonomik bir tercih olmadığını, aynı zamanda belirli kişilik eğilimleriyle ilişkili bir davranış örüntüsünü de yansıtabileceğine işaret etmektedir.

Anahtar Kelimeler: kripto para, karanlık dörtlü, Makyavelizm, narsisizm, psikopati, sadizm, yatırım davranışı.

Abstract

This study aimed to examine the relationship between individuals' level of interest in and knowledge about cryptocurrency exchanges and their dark personality traits. The sample consisted of 430 adults between the ages of 18 and 64. Data were collected using a Demographic Information Form, the Cryptocurrency Investors' Perception Level Questionnaire, and the Dark Tetrad Scale. Descriptive statistics, Pearson correlation analysis, independent-samples t-test, and one-way analysis of variance (ANOVA) were used to analyze the data. The findings revealed that higher levels of interest in and knowledge about cryptocurrency exchanges were associated with higher total scores on the Dark Tetrad. In addition, participants with more positive attitudes toward cryptocurrency exchanges scored significantly higher on dark personality traits than those with less positive attitudes. These findings

¹ Bu çalışma, birinci yazarın ikinci yazarın danışmanlığında yürüttüğü ve TÜBİTAK tarafından desteklenen 2209-A Üniversite Öğrencileri Araştırma Projeleri Destekleme Programı projesinden üretilmiştir.

suggest that engagement with cryptocurrency exchanges may reflect not only an economic preference but also a behavioral tendency associated with specific personality dispositions.

Keywords: cryptocurrency, dark tetrad, Machiavellianism, narcissism, psychopathy, sadism, investment behavior.

GİRİŞ

Dijitalleşmenin hızlanması, finansal piyasaların yapısını önemli ölçüde dönüştürmüştür; bu dönüşümün en görünür yansımalarından biri kripto para piyasaları olmuştur. Geleneksel yatırım araçlarından farklı olarak kripto varlıklar, kısa sürelerde yüksek kazanç ve kayıp potansiyeli taşıyan, dolayısıyla yüksek risk içeren bir yatırım alanı sunmaktadır (Sadhotra, Patel ve Mishra, 2024; Yadav ve Ashraf, 2025). Bu durum, kripto para piyasalarında alınan yatırım kararlarının yalnızca rasyonel ekonomik göstergelerle açıklanamayacağını; psikolojik eğilimler, bireysel farklılıklar ve kişilik örüntülerinin de karar süreçlerinde belirleyici olabileceğini göstermektedir. Nitekim belirsizlik, oynaklık ve hızlı kazanç beklentisinin baskın olduğu yatırım ortamlarında, risk alma eğilimi ile kişilik yapıları arasındaki ilişkinin daha görünür hâle geldiği bilinmektedir (Sadhotra vd., 2024).

Kripto para piyasalarına yönelik ilginin küresel ölçekte artması, bu alanın davranışsal açıdan incelenmesini daha önemli hâle getirmektedir. NORC at the University of Chicago (NORC, 2021) verilerine göre Amerikalıların yaklaşık %13'ü son bir yıl içinde kripto para yatırımı yaptığını belirtmiştir. Benzer biçimde, Financial Stability Board (FSB, 2022) raporu, 2020–2021 döneminde kripto varlıklara yönelik yatırımların dünya genelinde belirgin biçimde arttığını göstermektedir. Bu veriler, kripto para yatırımcılığının marjinal bir faaliyet olmaktan çıkarak yaygın bir yatırım davranışına dönüştüğüne işaret etmektedir. Ayrıca güncel çalışmalar, kripto para yatırımcılarının çoğunlukla genç ve teknolojiye yatkın bireylerden oluştuğunu; yatırım kararlarının kısa vadeli kâr beklentisi, yatırım fırsatlarını kaçırma endişesi (FOMO) ve sınırlı risk bilgisi gibi psikolojik ve davranışsal etkenlerden etkilendiğini göstermektedir (Yadav ve Ashraf, 2025). Bunun yanında, kripto paralara yönelik tutum, algılanan değer, güvenlik endişeleri ve risk algısının yatırım yapma ve bu yatırımı başkalarına önerme eğilimiyle ilişkili olduğu gösterilmiştir (Osakwe vd., 2025). Algılanan risk, performans beklentisi ve finansal okuryazarlığın da kripto para kullanım eğilimi üzerinde etkili olduğu bildirilmektedir (Arias-Oliva vd., 2019).

Bu çerçevede, kripto para yatırımcılığının yalnızca ekonomik değil, aynı zamanda kişilik temelli bir davranış örüntüsü olarak ele alınması gerekmektedir. Özellikle karanlık kişilik özellikleri bu bağlamda dikkat çekmektedir (Sezer vd., 2025). Makyavelizm, narsisizm, psikopati ve sadizmi kapsayan bu kişilik örüntüleri; manipülasyon, empati yoksunluğu, abartılı benlik algısı ve zarar verici davranışlara yatkınlık gibi özelliklerle tanımlanmaktadır (Paulhus vd., 2021). Literatür, karanlık kişilik özelliklerinin dürtüsellik, etik dışı davranış, yüksek risk alma, işlevsel olmayan baş etme biçimleri ve rasyonel olmayan karar süreçleriyle anlamlı biçimde ilişkili olduğunu göstermektedir (Buckels vd., 2013; Pelster vd., 2023; McIlvenna vd., 2025; Öztekin vd., 2025). Ayrıca makyavelizm ve narsisizmin finansal risk alma eğilimiyle pozitif yönde ilişkili olduğu, bu kişilik özelliklerinin ekonomik kararları anlamlı biçimde yordayabildiği belirtilmektedir (Gürlek ve Ok, 2022). Benzer biçimde, karanlık kişilik

özelliklerinin dürtüsel yatırım davranışları ve kısa vadeli kazanç odaklı stratejilerle bağlantılı olduğu da vurgulanmaktadır (Sadhotra vd., 2024).

Kripto para piyasalarının ani fiyat dalgalanmaları, kaldıraçlı işlem olanakları, yüksek belirsizlik düzeyi ve görece sınırlı denetim yapısı dikkate alındığında, bu alanın karanlık kişilik özelliklerinin davranışsal yansımalarını incelemek için elverişli bir bağlam sunduğu söylenebilir. Buna karşın mevcut literatürün ağırlıklı olarak risk algısı, finansal okuryazarlık, teknoloji kabulü ve yatırım tutumları üzerine yoğunlaştığı (Arias-Oliva vd., 2019; Osakwe vd., 2025; Yadav ve Ashraf, 2025; Yılmaz ve Başar Yılmaz, 2025); kripto para yatırımcılığı ile karanlık kişilik özellikleri arasındaki ilişkiyi doğrudan inceleyen çalışmaların ise sınırlı kaldığı görülmektedir (Sadhotra vd., 2024; Sezer vd., 2025). Özellikle kripto para borsasına yatırım yapan bireylerle yatırım yapmayan bireyleri karanlık kişilik özellikleri açısından karşılaştıran araştırmaların yeterince derinleşmediği dikkat çekmektedir. Bu boşluktan hareketle mevcut çalışma, kripto para borsasına yatırım yapan bireyler ile yatırım yapmayan bireylerin karanlık kişilik özellikleri bakımından anlamlı biçimde farklılaşıp farklılaşmadığını incelemeyi amaçlamaktadır. Bu yönüyle çalışmanın, kripto para yatırımcılığının yalnızca ekonomik bir tercih değil, aynı zamanda belirli psikolojik ve kişilik temelleriyle ilişkili bir davranış örüntüsü olup olmadığını açıklığa kavuşturarak literatüre kuramsal ve ampirik katkı sunması beklenmektedir.

YÖNTEM

Çalışma Grubu

Pamukkale Üniversitesi Sosyal ve Beşeri Bilimler Bilimsel Araştırma ve Yayın Etik Kurulu tarafından alınan 23.05.2025 tarih ve E-93803232-622.02-698383 sayılı araştırma izniyle, Google Forms üzerinden oluşturulan araştırma daveti, uygun örnekleme yöntemi kullanılarak merkez kampüste öğrenim gören üniversite öğrencilerinin yardımıyla, kripto para piyasaları konusunda bilgi sahibi olan ya da olmayan tüm yetişkin bireylerin ilgisine sunulmuştur. İki haftalık veri toplama sürecinin sonucunda toplamda 431 yetişkin araştırma davetine katılım göstermiş ve veri toplama araçlarını eksiksiz şekilde yanıtlamıştır. Uç değerlerin kontrolü için standart z puanları üzerinden gerçekleştirilen incelemenin ardından, karanlık dörtlüye ilişkin z puanı 4.22 olan bir katılımcı örneklemden çıkarılmış, analizler 430 (%53 kadın, %47 erkek) katılımcı üzerinden devam etmiştir. Katılımcıların yaşları 18 ile 64 arasında değişmekte olup, ortalama değer 28.42 (ss = 12.73) olarak hesaplanmıştır. Katılımcıların medeni durumu %72.80 bekâr, %27.20 evli olarak rapor edilmiştir. Katılımcıların eğitim düzeyi yüksek olup, lisans ve lisansüstü eğitim alanların oranı %89.80 olarak bildirilmiştir. Katılımcıların %17.20'si gelir düzeylerini zayıf, %76.50'si orta ve %6.30'u yüksek olarak algılamaktadır. Katılımcıların karanlık kişilik örüntülerine dayalı analizler, mevcut katılımcılar arasında kripto para borsası konusunda yüksek düzeyde bilgi sahibi olan %27'lik üst-grup ile kripto para borsası konusunda bilgi sahibi olmayan %27'lik alt-grup arasında karşılaştırmalı bir desende yürütülmüştür. Buna göre, kripto para borsasına ilişkin standart z puanı -1.33 ile -.84 arasında değişen 118 katılımcı %27'lik alt-gruba, standart z puanı .75 ile 2.33 arasında değişen 119 katılımcı ise %27'lik üst-gruba atanmıştır.

Veri Toplama Araçları

Kripto Varlık Yatırımcıları Algı Düzeyi Anketi

Katılımcıların kripto borsa piyasasına ilişkin algılarını değerlendirmek amacıyla Özay ve Mirgen (2021) tarafından geliştirilen 22 adet maddeden oluşan anket formundan yararlanılmıştır. İlgili maddeler “Borsalardan kripto para alım, satım ve transfer işlemlerimi zorlanmadan gerçekleştirebiliyorum, Madde 1”; “Teknik analiz için mum grafik formasyonları hakkında temel bilgiye sahibim, Madde 5” veya “Güvendiğim ve işlem yaptığım yabancı borsalar var, Madde 11” şeklinde ifadeler içermektedir. İlgili ankette yer alan maddeler üzerinden ilk kez mevcut çalışma kapsamında yürütülen doğrulayıcı faktör analizi sonucunda, faktör yük değeri .30’un altında olan 6 madde analizden çıkarılmış, ölçme aracının 16 maddeden oluşan nihai haline ilişkin elde edilen indeksler iyi uyum değerlerine işaret etmiştir ($\chi^2 = 285.48$, $p < .001$; $\chi^2/sd = 2.86$; $CFI = .93$; $GFI = .92$; $RMSEA = .066$; $SRMR = .054$). İlgili maddeler 3’lü Likert tipte (1 = Katılmıyorum, 2 = Kararsızım, 3 = Katılıyorum) değerlendirilmektedir. Mevcut çalışmada ölçeğin iç güvenirliğine ilişkin Cronbach alpha katsayısı .90 olarak hesaplanmıştır. Anket formundan alınan puan arttıkça, katılımcıların kripto para borsalarına ilişkin ilgilerinin ve bilgilerinin de arttığı kabul edilmektedir.

Karanlık Dörtlü Ölçeği

Katılımcıların karanlık kişilik örüntüleri Paulhus ve arkadaşları (2021) tarafından geliştirilen, Aytaç (2022) tarafından Türkçe’ye uyarlanan Karanlık Dörtlü Ölçeği (The Short Dark Tetrad-SD4) yoluyla ölçülmüştür. İlgili ölçek “Kurnazca planlanmış (hileli) bir planın başarılı olmasını çok seviyorum, Madde 7”; “Özel olduğumu biliyorum çünkü insanlar devamlı böyle söylüyor, Madde 11”; “Ara sıra tehlikeli durumlara bulaşırım, Madde 20” ve “Şiddet içeren filmler veya bilgisayar oyunlarından keyif alırım, Madde 23” şeklinde ifadeler içeren 5’li Likert tipte (1= Kesinlikle katılmıyorum, 5 = Kesinlikle katılıyorum) bir ölçme aracıdır. Mevcut çalışmada, ölçeğin Türkçe uyarlama çalışmasında da rapor edildiği üzere, faktör yük değeri .30’un altında olan dört madde (m1, m14, m2, m27) analizlerden çıkarılmış (Aytaç,2022), ölçeğin dört faktör ve 24 maddeden oluşan nihai haline ilişkin elde edilen indeksler iyi uyum değerlerine işaret etmiştir ($\chi^2 = 505.34$, $p < .001$; $\chi^2/sd = 2.11$; $CFI = .90$; $GFI = .91$; $RMSEA = .051$; $SRMR = .063$). Mevcut çalışmada ölçeğin iç güvenirliğine ilişkin rapor edilen Cronbach alpha katsayısı Makyavelizm alt-boyutu için .66, narsisizm alt-boyutu için .79, psikopati alt-boyutu için .73, sadizm alt-boyutu için .78, ölçeğin toplam puanı için .84 olarak hesaplanmıştır. Ölçekten alınan puan arttıkça, katılımcıların Makyavelizm, narsisizm, psikopati ve sadizm olarak adlandırılan karanlık kişilik örüntülerinin de arttığı kabul edilmektedir.

Verilerin Analizi

Veri setine ilişkin betimsel istatistiklerin raporlanmasında ve farka dayalı karşılaştırmalı analizlerin yürütülmesinde IBM SPSS 22.0 programından yararlanılmıştır. Ölçme araçlarının faktör yapısına ilişkin yürütülen analizler için AMOS 22.0 programı kullanılmıştır.

BULGULAR

Araştırma değişkenlerine ilişkin betimsel istatistikler Tablo 1’de sunulmuştur. İlgili tablodaki verilere göre, araştırma değişkenlerine ilişkin çarpıklık ve basıklık katsayılarının ± 1 aralığında ortaya çıktığı ve dağılımın parametrik testlerin kullanımı için ön koşul olarak kabul edilen normal dağılım varsayımını karşıladığı kabul edilmiştir.

Tablo 1. *Betimsel istatistikler*

	N	En düşük	En yüksek	Ortalama	Standart Sapma	Çarpıklık	Basıklık
Karanlık Dörtlü	430	1.33	4.42	2.69	.54	.37	.11
Makyavelizm	430	1.00	5.00	3.02	.71	.08	-.09
Narsisizm	430	1.00	5.00	2.99	.75	.19	-.21
Psikopati	430	1.00	4.83	2.23	.71	.71	.47
Sadizm	430	1.00	5.00	2.52	.86	.40	-.23
Kripto Tutum	430	1.00	2.88	1.68	.51	.45	-.92

Araştırma değişkenleri arasındaki birlikte değişim düzeyini betimleyen Pearson korelasyon katsayıları Tablo 2’de sunulmuştur. İlgili tablodaki verilere göre, karanlık dörtlü kişilik özelliklerine ile kripto para borsalarına yönelik tutum arasındaki korelasyon katsayıları .16 ile .28 arasında değişmiştir.

Tablo 2. *Araştırma değişkenlerine ilişkin Pearson korelasyon katsayıları*

	1	2	3	4	5	6
1. Karanlık Dörtlü	-					
2. Makyavelizm	.66**	-				
3. Narsisizm	.68**	.30**	-			
4. Psikopati	.70**	.21**	.35**	-		
5. Sadizm	.77**	.36**	.28**	.45**	-	
6. Kripto Tutum	.28**	.16**	.18**	.21**	.23**	-

N = 430, ** $p < .01$

Katılımcıların karanlık kişilik örüntülerine odaklanan farka dayalı analizler, kripto para borsası hakkında yüksek düzeyde bilgi sahibi olan %27’lik üst-grup ile kripto para borsası hakkında bilgi sahibi olmayan %27’lik alt-grup arasında karşılaştırmalı bir desende yürütülmüştür. Karanlık kişilik örüntülerine ilişkin alt ve üst grupta yer alan katılımcılar arasındaki farkı analiz etmek için yürütülen t testi sonuçları Tablo 3’te sunulmuştur.

Tablo 3. Alt-üst gruplara ilişkin bağımsız örneklemeler için t testi sonuçları

	Kripto Tutum	n	Ortalama	Standart Sapma	t(df)	p	Cohen's d	95% Güve Aralığı (d)
Karanlık Dörtlü	Alt %27	118	2.49	.49	-5.32 (235)	.000	.69	[0.43, 0.95]
	Üst %27	119	2.86	.56				
Makyavelizm	Alt %27	118	2.90	.64	-2.70 (235)	.007	.35	[0.09, 0.61]
	Üst %27	119	3.16	.83				
Narsisizm	Alt %27	118	2.79	.75	-3.77 (235)	.000	.49	[0.23, 0.75]
	Üst %27	119	3.15	.72				
Psikopati	Alt %27	118	1.99	.53	-3.99 (235)	.000	.52	[0.26, 0.77]
	Üst %27	119	2.35	.82				
Sadizm	Alt %27	118	2.29	.79	-4.27 (235)	.000	.55	[0.29, 0.81]
	Üst %27	119	2.76	.91				

Tablo 3'te sunulan t testi sonuçlarına göre, kripto para borsalarına yönelik yüksek veya düşük düzeyde ilgiye sahip katılımcıların karanlık kişilik özelliklerine ilişkin puan ortalamaları anlamlı şekilde farklılaşmaktadır. Karanlık kişilik özelliklerinin alt-boyutlarına ilişkin karşılaştırmalar incelendiğinde, Makyavelizm alt-boyutuna ilişkin üst grup puanı ($M = 3.16$, $SD = 0.83$), alt grup puanından ($M = 2.90$, $SD = 0.64$) anlamlı düzeyde daha yüksektir, $t(235) = -2.70$, $p = .007$, $Cohen's d = 0.35$. Makyavelizm alt-boyutuna ilişkin etki büyüklüğü küçük-orta düzeydedir. Narsisizm alt-boyutuna ilişkin üst grup puanı ($M = 3.15$, $SD = 0.72$), alt grup puanından ($M = 2.79$, $SD = 0.75$) anlamlı düzeyde daha yüksektir, $t(235) = -3.77$, $p < .001$, $Cohen's d = 0.49$. Narsisizm alt-boyutuna ilişkin etki büyüklüğü orta düzeydedir. Psikopati alt-boyutuna ilişkin üst grup puanı ($M = 2.35$, $SD = 0.82$), alt grup puanından ($M = 1.99$, $SD = 0.53$) anlamlı düzeyde daha yüksektir, $t(202.18) = -3.99$, $p < .001$, $Cohen's d = 0.52$. Psikopati alt-boyutuna ilişkin etki büyüklüğü orta düzeydedir. Sadizm alt-boyutuna ilişkin üst grup puanı ($M = 2.76$, $SD = 0.91$), alt grup puanından ($M = 2.29$, $SD = 0.79$) anlamlı düzeyde daha yüksektir, $t(235) = -4.27$, $p < .001$, $Cohen's d = 0.55$. Sadizm alt-boyutuna ilişkin etki büyüklüğü orta düzeydedir. Karanlık kişilik özellikleri toplam puanına ilişkin üst grup puanı ($M = 2.86$, $SD = 0.56$), alt grup puanından ($M = 2.49$, $SD = 0.49$) anlamlı düzeyde daha yüksektir, $t(235) = -5.32$, $p < .001$, $Cohen's d = 0.69$. Karanlık kişilik özelliklerine ilişkin bu bulgu orta-geniş düzeyde bir etki büyüklüğüne işaret etmektedir.

Kripto para borsalarına ilişkin tutum boyutunda alt ve üst grubu temsil eden iki uçlu karşılaştırmaya ek olarak, karanlık kişilik özelliklerine ilişkin gruplar arası farklılaşmanın hiyerarşik bir doğaya sahip olup olmadığını inceleyebilmek adına ek bir analiz daha yürütülmüştür. Buna göre; kripto para borsalarına yönelik tutum konusunda alt<orta<üst grubu temsil eden üç gruplu karşılaştırma için yürütülen tek yönlü ANOVA sonuçları Tablo 4'te sunulmuştur. Kripto para borsalarına yönelik tutum konusunda alt, orta ve üst gruplar arasında karanlık dörtlü kişilik özellikleri açısından yürütülen tek yönlü ANOVA sonuçları, tüm değişkenlerde gruplar arasında anlamlı farklılıklar olduğunu göstermiştir. Üç ve daha fazla grup arasındaki karşılaştırmalara ilişkin etki büyüklüğünün yorumlanmasında omega kare (ω^2) değeri esas alınmıştır. Ayrıca gruplar arasındaki farkın kaynağına ilişkin yürütülen post-hoc analizlerinde, varyansların homojenliğinin sağlanması durumunda (Levene $p > .05$) Bonferroni testi, varyansların homojenliğinin sağlanamaması durumunda ise (Levene $p < .05$) Games-Howell testi kullanılmıştır.

ANOVA sonuçlarına göre, karanlık dörtlü toplam puanları gruplara göre anlamlı biçimde farklılaşmıştır, $F(2, 427) = 14.82$, $p < .001$, $\omega^2 = .060$. Bu bulgu, orta düzeyde bir etki büyüklüğüne işaret etmektedir. Varyansların homojenliği sağlandığından (Levene $p = .39$), post-hoc analizinde Bonferroni testi uygulanmış ve alt grubun ($M = 2.49$, $SD = 0.49$) orta ($M = 2.71$, $SD = 0.51$) ve üst gruptan ($M = 2.86$, $SD = 0.56$), ayrıca orta grubun da üst gruptan anlamlı derecede daha düşük puan aldığı belirlenmiştir. Makyavelizm puanları açısından gruplar arasında anlamlı bir fark bulunmuştur, $F(2, 427) = 4.01$, $p = .019$, $\omega^2 = .014$. Omega kare değeri, bu farkın düşük düzeyde bir etki büyüklüğüne işaret ettiğini göstermektedir. Levene testinin anlamlı olması nedeniyle ($p = .009$), post-hoc analizinde Games–Howell testi uygulanmış ve üst grubun ($M = 3.16$, $SD = 0.83$) alt gruptan ($M = 2.90$, $SD = 0.64$) anlamlı derecede daha yüksek puan aldığı saptanmıştır. Narsisizm puanları gruplara göre anlamlı farklılık göstermiştir, $F(2, 427) = 7.19$, $p = .001$, $\omega^2 = .028$. Bu değer, düşük-orta bir etki büyüklüğüne işaret etmektedir. Varyansların homojenliği sağlandığından (Levene $p = .87$), post-hoc analizinde Bonferroni testi uygulanmış ve alt grubun ($M = 2.79$, $SD = 0.75$) hem orta ($M = 3.01$, $SD = 0.74$) hem de üst gruptan ($M = 3.15$, $SD = 0.72$) anlamlı derecede daha düşük puanlara sahip olduğu belirlenmiştir. Psikopati puanları bakımından gruplar arasında anlamlı farklılıklar bulunmuştur, $F(2, 427) = 9.77$, $p < .001$, $\omega^2 = .039$. Bu sonuç, orta düzeye yakın bir etki büyüklüğüne işaret etmektedir. Varyansların homojenliği sağlanmadığından (Levene $p = .000$), post-hoc analizinde Games–Howell testi uygulanmış ve alt grubun ($M = 1.99$, $SD = 0.53$) hem orta ($M = 2.30$, $SD = 0.69$) hem de üst gruptan ($M = 2.35$, $SD = 0.82$) anlamlı derecede daha düşük puan aldığı görülmüştür. Son olarak sadizm puanları açısından gruplar arasında anlamlı bir fark saptanmıştır, $F(2, 427) = 9.26$, $p < .001$, $\omega^2 = .037$. Omega kare değeri, orta düzeye yakın bir etki büyüklüğünü göstermektedir. Varyansların homojenliği sağlandığı için (Levene $p = .180$), post-hoc analizinde Bonferroni testi uygulanmış ve üst grubun ($M = 2.76$, $SD = 0.91$) alt gruptan ($M = 2.29$, $SD = 0.79$) anlamlı derecede daha yüksek sadizm puanlarına sahip olduğu belirlenmiştir.

Tablo 4. Alt-orta-üst gruplara ilişkin tek yönlü Anova testi sonuçları

	Grup	n	M	SD	$F(2,427)$	p	η^2	ω^2
Karanlık Dörtlü	Alt %27	118	2.49	0.49				
	Orta Grup	193	2.71	0.51	14.82	.000	.065	.060
	Üst %27	119	2.86	0.56				
Makyavelizm	Alt %27	118	2.90	0.64				
	Orta Grup	193	3.01	0.68	4.01	.019	.018	.014
	Üst %27	119	3.16	0.83				
Narsisizm	Alt %27	118	2.79	0.75				
	Orta Grup	193	3.01	0.74	7.19	.001	.033	.028
	Üst %27	119	3.15	0.72				
Psikopati	Alt %27	118	1.99	0.53				
	Orta Grup	193	2.30	0.69	9.77	.000	.044	.039
	Üst %27	119	2.35	0.82				
Sadizm	Alt %27	118	2.29	0.79				
	Orta Grup	193	2.52	0.84	9.26	.000	.042	.037
	Üst %27	119	2.76	0.91				

Gruplar arasındaki ikili ve üçlü karşılaştırmalara ilişkin bulgular bir bütün halinde değerlendirildiğinde, kripto para borsalarına yönelik tutuma ilişkin alt<orta<üst grubu temsil eden katılımcılar arasındaki hiyerarşik farklılaşma, yalnızca karanlık dördütlü toplam puanları üzerinden doğrulanabilmektedir. Karanlık dördütlü alt-boyutları özelindeki puan kırılımları incelendiğinde ise, dikkat çekici bir bulgu olarak, kripto para borsalarına yönelik en düşük tutuma sahip olan alt-grubun karanlık kişilik özellikleri, orta ve üst gruptaki katılımcılardan anlamlı şekilde ayrılmaktadır. Mevcut bulgular, kripto para borsalarına yönelik düşük düzeydeki ilgiye sahip bireylerin, karanlık kişilik özelliklerinden görece arınık olmaya yatkın olduklarına işaret etmektedir.

SONUÇ VE TARTIŞMA

Bu çalışma, kripto para borsalarına yönelik tutum ile karanlık kişilik özellikleri arasındaki ilişkiyi incelemiştir. Bulgular, kripto para borsalarına yönelik tutum arttıkça karanlık dördütlü toplam puanının da yükseldiğini; Makyavelizm, narsisizm, psikopati ve sadizm alt boyutlarının tümünün bu tutumla pozitif ve anlamlı biçimde ilişkili olduğunu göstermiştir. Ayrıca kripto para borsalarına yönelik ilgi ve bilgi düzeyi daha yüksek olan katılımcıların, bu alana daha düşük düzeyde yönelen katılımcılara kıyasla karanlık kişilik özellikleri bakımından daha yüksek puanlar aldığı belirlenmiştir. Bu bulgular, kripto para piyasalarına yönelimin yalnızca ekonomik gerekçelerle değil, kişilik temelli eğilimlerle de ilişkili olabileceğine işaret etmektedir.

Bu sonuçlar, kripto para piyasalarının yapısal özellikleri çerçevesinde değerlendirildiğinde kuramsal olarak tutarlıdır. Yüksek belirsizlik, ani fiyat dalgalanmaları ve kısa sürede kazanç beklentisi, yatırım kararlarının yalnızca rasyonel değerlendirmelerle açıklanmasını güçleştirmektedir. Nitekim yüksek risk içeren yatırım ortamlarında bireysel özelliklerin karar alma süreçleri üzerindeki etkisinin daha görünür hâle geldiği belirtilmektedir (Sadhotra, Patel ve Mishra, 2024). Benzer biçimde, kripto para yatırımcılarının kararlarında kısa vadeli kazanç beklentisi ve finansal fırsatları kaçırma endişesi gibi psikolojik etkenlerin belirleyici olduğu vurgulanmaktadır (Yadav ve Ashraf, 2025). Mevcut bulgular, bu değerlendirmeleri destekleyerek kripto para yatırımcılığının davranışsal ve kişilik temelli boyutlarını görünür kılmaktadır.

Gruplar arası karşılaştırmalar da aynı örüntüyü doğrulamaktadır. Kripto para borsalarına ilgisi düşük olan katılımcıların, orta ve yüksek düzeyde ilgi gösteren katılımcılara kıyasla karanlık kişilik özellikleri bakımından daha düşük puanlar alması, bu piyasaya yönelen bireylerin belirli kişilik eğilimleri açısından farklılaşabildiğini düşündürmektedir. Bununla birlikte, alt boyutlar arasındaki farklılıkların aynı düzeyde ortaya çıkmaması, ilişkinin doğrusal ve tek boyutlu değil, daha karmaşık bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir. Makyavelizm boyutuna ilişkin bulgular, kripto para borsalarına daha fazla yönelen bireylerin daha stratejik, araçsal ve çıkar odaklı eğilimler taşıyabileceğini düşündürmektedir. Paulhus ve arkadaşlarının (2021) Makyavelizm kavramını yönlendirici ve hesaplayıcı bir kişilik özelliği olarak tanımlaması bu yorumu desteklemektedir. Finansal karar alma bağlamında, yüksek getiri potansiyeli taşıyan ve hızlı pozisyon alma imkânı sunan yatırım alanlarına yönelimin bu özelliklerle uyumlu olduğu söylenebilir. Makyavelizm ile finansal risk alma eğilimi arasındaki pozitif ilişkinin gösterilmiş olması da bu değerlendirmeyi güçlendirmektedir (Gürlek ve Ok, 2022). Narsisizm boyutunda elde edilen bulgular da benzer biçimde yorumlanabilir. Narsisistik özellikler, üstünlük algısı, başarıya verilen önem ve ayrıcalıklı benlik kurgusuyla ilişkilidir (Paulhus vd., 2021). Yüksek kazanç

ihtimali, görünür başarı anlatıları ve bireysel performansı öne çıkaran yapısı nedeniyle kripto para piyasaları, narsisistik eğilimleri daha yüksek bireyler açısından daha çekici olabilir. Finansal risk alma ile narsisizm arasındaki pozitif ilişkinin ortaya konmuş olması da mevcut bulgularla uyumludur (Gürlek ve Ok, 2022). Bu çerçevede, kripto para piyasalarına yönelim bazı bireyler için yalnızca ekonomik değil, benlik algısı ve öz-değerin pekiştirilmesiyle ilişkili bir alan olarak da değerlendirilebilir. Psikopati boyutuna ilişkin bulgular da dikkat çekicidir. Psikopati; dürtüsellik, düşük empati, heyecan arayışı ve sonuçları yeterince değerlendirmeden hareket etme eğilimiyle ilişkilendirilmektedir (Paulhus vd., 2021). Karanlık kişilik özelliklerinin dürtüsellik ve işlevsel olmayan baş etme biçimleriyle bağlantılı olduğu gösterilmiştir (McIlvenna vd., 2025). Benzer biçimde, psikopati ile riskli davranışlar arasında anlamlı ilişkiler bulunduğu bildirilmektedir (Öztekin vd., 2025). Kripto para piyasalarının hızlı karar verme gerektiren ve yüksek oynaklık içeren yapısı dikkate alındığında, psikopati puanlarının daha yüksek seyretmesi beklenebilir bir sonuç olarak değerlendirilebilir. Sadizm boyutunda elde edilen bulgular da önemlidir. Sadizm, düşük empati ve zarar verici eğilimlerle ilişkili bir kişilik özelliği olarak tanımlanmaktadır (Buckels vd., 2013; Paulhus vd., 2021). Sadizm puanlarının kripto para borsalarına ilgisi yüksek olan grupta daha yüksek bulunması, yüksek risk ve sert rekabet içeren yatırım ortamlarının bazı bireyler için daha çekici olabileceğini düşündürmektedir (Paulhus vd., 2021). Bununla birlikte, bu bulgu sadizmin doğrudan yatırım davranışına yol açtığını değil, iki değişken arasında anlamlı bir birliktelik bulunduğunu göstermektedir.

Araştırmanın genel bulguları birlikte değerlendirildiğinde, kripto para borsalarına yönelik tutum ile karanlık kişilik özellikleri arasında düzenli bir ilişki bulunduğu görülmektedir. Ancak bu ilişkinin sınırlı ile orta düzey arasında değişmesi, kripto para yatırımcılığının yalnızca kişilik özellikleri üzerinden açıklanamayacağını da ortaya koymaktadır. Nitekim algılanan risk, performans beklentisi ve finansal bilgi düzeyinin kripto para kullanma eğilimi üzerinde etkili olduğu belirtilmektedir (Arias-Oliva vd., 2019). Benzer şekilde, yatırım tutumu, algılanan değer ve güvenlik kaygılarının da bu süreçte belirleyici olduğu gösterilmiştir (Osakwe vd., 2025). Bu nedenle mevcut çalışma, kişilik değişkenlerinin önemini ortaya koymakla birlikte, kripto para yatırımcılığının çok boyutlu bir psikososyal ve finansal olgu olduğuna da işaret etmektedir.

Önceki araştırmalar kripto para yatırımcılığını ağırlıklı olarak finansal okuryazarlık, risk algısı, teknolojiye yatkınlık ve yatırım motivasyonları üzerinden incelemiştir (Arias-Oliva vd., 2019; Osakwe vd., 2025; Yadav ve Ashraf, 2025). Buna karşılık, kripto para piyasalarına yönelen bireylerle yönelmeyen bireyleri karanlık kişilik özellikleri bakımından karşılaştıran çalışmalar sınırlı kalmıştır (Sadhotra vd., 2024; Sezer vd., 2025). Bu çalışma, yatırım davranışının psikolojik boyutunu doğrudan görünür kılarak konuya kişilik temelli bir açıklama düzeyi eklemektedir. Böylece finansal karar alma süreçlerinin yalnızca bilgi, beklenti ve risk algısı çerçevesinde değil, daha derin kişilik örüntüleri bağlamında da ele alınması gerektiğini göstermektedir. Bununla birlikte, bulgular bazı sınırlılıklar çerçevesinde değerlendirilmelidir. İlk olarak, araştırmanın kesitsel deseni nedeniyle değişkenler arasındaki ilişkiler nedensellik temelinde yorumlanamaz. İkinci olarak, verilerin öz-bildirim yoluyla toplanmış olması sosyal beğenirlik ve kendini olduğundan farklı sunma riskini içermektedir. Üçüncü olarak, örneklemin büyük ölçüde eğitim düzeyi yüksek bireylerden oluşması, sonuçların genellenebilirliğini sınırlandırabilir. Son olarak, bu çalışmada doğrudan yatırım davranışından çok kripto para borsalarına yönelik tutum incelenmiştir. Bu nedenle gelecekte yapılacak araştırmalarda işlem sıklığı, yatırım miktarı, kazanç-zarar profili, kaldıraçlı işlemlere yönelim ve kısa vadeli spekülasyon

davranışlar gibi daha somut davranışsal göstergelerin dâhil edilmesi uygun olabilir. Sonuç olarak, bu çalışma kripto para borsalarına yönelik tutum ile karanlık kişilik özellikleri arasında anlamlı bir ilişki bulunduğunu göstermektedir. Kripto para borsalarına daha yüksek düzeyde ilgi duyan bireylerin Makyavelizm, narsisizm, psikopati ve sadizm boyutlarında daha yüksek puanlar alması, finansal karar alma süreçlerinin yalnızca rasyonel ve ekonomik değişkenlerle açıklanamayacağını ortaya koymaktadır. Bu bağlamda kripto para yatırımcılığı, yalnızca ekonomik bir tercih değil, aynı zamanda psikolojik eğilimler ve kişilik örüntüleriyle ilişkili bir davranış alanı olarak değerlendirilmelidir.

KAYNAKÇA

- Arias-Oliva, M., Pelegrín-Borondo, J., & Matías-Clavero, G. (2019). Variables influencing cryptocurrency use: A technology acceptance model in Spain. *Frontiers in Psychology*, 10, Article 475. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2019.00475>
- Aytaç, M. B. (2022). Karanlık dörtlü (The Short Dark Tetrad-SD4) ölçeğinin Türkçeye uyarlanması ve karanlık dörtlünün pazarlama araştırmalarındaki yerinin tartışılması. *İşletme Ekonomi ve Yönetim Araştırmaları Dergisi*, 5(1), 129–149. <https://doi.org/10.33416/baybem.1041678>
- Buckels, E. E., Jones, D. N., & Paulhus, D. L. (2013). Behavioral confirmation of everyday sadism. *Psychological Science*, 24(11), 2201–2209. <https://doi.org/10.1177/0956797613490749>
- Financial Stability Board. (2022, February 16). *Assessment of risks to financial stability from crypto-assets*. <https://www.fsb.org/uploads/P160222.pdf>
- Gürlek, T. T., & Ok, A. B. (2022). Karanlık üçlü kişilik özellikleri, risk alma eğilimi, örgütsel bağlılık, kariyer bağlılığı ve işten ayrılma niyeti arasındaki ilişkiler. *Fiscaoeconomia*, 6(2), 457–477. <https://doi.org/10.25295/fsecon.1074806>
- McIlvenna, M., Truhan, T., & Papageorgiou, K. A. (2025). More than just aversive: A network analysis of the Dark Triad, coping, and psychopathology. *Behavioral Sciences*, 15(12), Article 1617. <https://doi.org/10.3390/bs15121617>
- NORC at the University of Chicago. (2021, July 22). More than one in ten Americans surveyed invest in cryptocurrencies. <https://www.norc.org/research/library/more-than-one-in-ten-americans-surveyed-invest-in-cryptocurrenci.html>
- Osakwe, C. N., Ogunmokin, O. A., Elgammal, I., Baeva, D., & Kamneva, V. (2025). An integrative model for understanding cryptocurrency investment-related behaviours: A comparison between millennials and pre-millennials. *International Journal of Finance & Economics*, 30(3), 2603–2621. <https://doi.org/10.1002/ijfe.3031>
- Özay, M. A., Mirgen, Ç. (2021). Kripto para yatırımcılarının bilgi düzeylerine etki eden faktörler ve algı düzeyleri üzerine bir inceleme. *Uluslararası Ekonomi ve Siyaset Bilimleri Akademik Araştırmalar Dergisi*, 5 (13), 39-55.
- Öztekin, G. G., Öрки, H., Alkhulayfi, A. M. A., & Yıldırım, M. (2025). The Dark Triad traits and suicide risk in Turkish university students: The mediating effect of depression. *European Journal of Psychology Open*, 84(4). <https://doi.org/10.1024/2673-8627/a000083>
- Paulhus, D. L., Buckels, E. E., Trapnell, P. D., & Jones, D. N. (2021). Screening for dark personalities: The Short Dark Tetrad (SD4). *European Journal of Psychological Assessment*, 37(3), 208–222. <https://doi.org/10.1027/1015-5759/a000602>

- Pelster, M., Hofmann, A., Klocke, N., & Warkulat, S. (2023). Dark triad personality traits and selective hedging. *Journal of Business Ethics*, 182(1), 261–286. <https://doi.org/10.1007/s10551-021-04985-z>
- Sadhotra, N., Patel, S., & Mishra, P. (2024). The dark web: Dark personality traits of Machiavellianism, narcissism, and psychopathy and exploiting stock markets. In A. C. Scheinbaum (Ed.), *The darker side of social media: Consumer psychology and mental health* (2nd ed., pp. 73–100). Routledge.
- Sezer, A., Yaşar, M. E., & Ata, S. (2025). Karanlık üçlü kişilik özellikleri, tüketici sinizmi ve kompulsif satın alma davranışı arasındaki ilişkinin incelenmesi. *Ekonomik ve Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 21(1), 239–254. <https://izlik.org/JA64NL68XZ>
- Yadav, M., & Ashraf, G. Y. (2025). Cryptocurrency investment behavior and risk perception among retail investors. *International Scientific Journal of Engineering and Management*, 4(6), 1–7. <https://doi.org/10.55041/ISJEM03957>
- Yılmaz, A. B., & Başar Yılmaz, S. (2025). Kripto para farkındalığı ile tutum arasındaki ilişki: Üniversite öğrencileri üzerine bir saha araştırması. *Sakarya Üniversitesi İşletme Enstitüsü Dergisi*, 7(2), 215–233. <https://doi.org/10.47542/sauied.1783324>

Cumhuriyet Dönemi Antik Roma’ında Kadınların Statüsü

The Status of Women in the Republican Period of Ancient Rome

Tuğba VAMİN¹

¹E-mail: tugbavamin3@gmail.com; ORCID: 0009-0005-7471-0755; Uludağ Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Tarih Anabilim Dalı, Eskiçağ Tarihi Bilim Dalı, Bursa / Türkiye.

Özet

Bu çalışma, Roma Cumhuriyet Dönemi’nde (MÖ 509-27) kadınların toplumsal statüsünü, hukuki konumlarını ve kamusal alandaki görünürlüklerini incelemeyi amaçlamaktadır. Roma toplumunun sınıfsal yapısı içerisinde kadınların konumu, özellikle *patricius* ve *plebs* ayrımı çerçevesinde ele alınmıştır. Kadınların aile içindeki rolleri, hukuki ehliyetleri ve kamusal alandaki sınırlı varlıkları tartışılmıştır. Bunun yanı sıra, Vesta Rahipliği örneği üzerinden kadınların kamusal alanda istisnai bir statüye nasıl erişebildikleri incelenmiştir. Araştırmada ayrıca II. Pön Savaşı sonrasında çıkarılan *Lex Oppia* yasası ve bu yasanın kadınlar üzerindeki ekonomik ve toplumsal etkileri ele alınmıştır. Söz konusu yasanın kaldırılmasına yönelik kadın protestoları, Roma tarihinde kadınların birlikte hareket ettikleri eylem açısından değerlendirilmiştir. Roma toplumunda kadınların pasif konumda olmadıklarını; aksine belirli koşullar altında toplumsal ve siyasal süreçlere müdahil olabildiklerini ortaya koymayı amaçlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: aile, kamusal alan, kadın statüsü, *Lex Oppia*, Roma Cumhuriyeti dönemi, Vesta rahibeliği

Abstract

This study examines the social status, legal positions, and visibility of women in the public sphere during the Roman Republic Period (509–27 BCE). Within the class structure of Roman society, the position of women is addressed particularly within the framework of the distinction between *patricius* and *plebs*. The roles of women within the family, their legal capacities, and their limited presence in the public sphere are discussed. In addition, through the example of the Vestal Priesthood, it is examined how women were able to attain an exceptional status in the public sphere.

The study also examines the *Lex Oppia* law enacted after the Second Punic War and the economic and social effects of this law on women. The protests by women aimed at the repeal of this law are evaluated in terms of collective action undertaken by women in Roman history. It aims to demonstrate that women in Roman society were not in a passive position; on the contrary, under certain conditions, they were able to become involved in social and political processes.

Keywords: family, public sphere, status of women, *Lex Oppia*, Roman Republic, Vestal priesthood

GİRİŞ

Bu çalışma, Roma Cumhuriyet Dönemi'nde (MÖ 509–27) kadınların toplumsal yaşam içerisindeki konumunu, özellikle *patricius* ve *plebs* sınıfsal ayrımı çerçevesinde incelemeyi amaçlamaktadır. Roma toplumunun sınıfsal yapısı içerisinde kadınların bu ayrım karşısında nasıl konumlandıkları, kendi içlerinde bir dayanışma geliştirme potansiyeline sahip olup olmadıkları ve erkek egemen toplumsal düzen içerisinde ne ölçüde görünürlük kazanabildikleri çalışmanın temel araştırma problemini oluşturmaktadır.

Roma toplumunda kadınların statüsüne ilişkin değerlendirmeler, mevcut modern akademik literatür çerçevesinde ele alınmaktadır. Bu doğrultuda konuya ilişkin kitaplar, makaleler ve tez çalışmaları üzerinden yürütülen inceleme, kadınların Roma toplumunda büyük ölçüde aile kurumu içerisinde tanımlandığını ve kamusal alandaki varlıklarının belirgin sınırlar içinde şekillendiğini ortaya koymaktadır. Bununla birlikte literatürde, kadınların tamamen pasif bir konumda olmadığı; özellikle belirli tarihsel kırılma anlarında ve toplumsal gerilim süreçlerinde kolektif hareketler aracılığıyla kamusal görünürlük kazanabildikleri vurgulanmaktadır. Bu durum, kadınların Roma toplumundaki konumunun yalnızca hukuki sınırlılıklar üzerinden değil, aynı zamanda toplumsal pratikler ve tarihsel bağlam içerisinde değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir. Bu çerçevede çalışma, kadınların Roma toplumunda hangi alanlarda statü elde edebildiklerini ortaya koymayı, özellikle Vesta Rahibeliği örneği üzerinden kadınların kamusal alanda istisnai bir konuma nasıl ulaşabildiklerini analiz etmeyi hedeflemektedir. Bunun yanı sıra II. Pön Savaşı sonrasında yürürlüğe giren *Lex Oppia* yasasının ortaya çıkış süreci, kadınlar üzerindeki ekonomik ve toplumsal etkileri ile kadınların bu yasaya karşı geliştirdikleri tepkiler incelenmektedir. Bu bağlamda, söz konusu yasa etrafında şekillenen protestolar, kadınların kolektif eylem kapasitesini ve kamusal alandaki sınırlı ancak etkili varlıklarını anlamak açısından önemli bir örnek teşkil etmektedir.

Bu çalışmanın önemi, Roma Cumhuriyet Dönemi'nde kadınların toplumsal konumunu yalnızca aile ve hukuk bağlamında değil; sınıfsal yapı, kamusal alan ve kolektif dinamikleri çerçevesinde çok boyutlu bir şekilde ele almasıdır. Bu yönüyle çalışma, Roma toplumunda kadınların edilgen bir konumda olmadıklarını, aksine belirli tarihsel koşullar altında toplumsal ve siyasal süreçlere müdahil olabildiklerini ortaya koyarak mevcut literatüre katkı sunmayı amaçlamaktadır.

YÖNTEM

Roma Cumhuriyet Dönemi'nde kadınların toplumsal ve hukuki konumunu incelemeye yönelik olarak nitel araştırma yöntemi çerçevesinde tasarlanmıştır. Araştırmada, tarihsel olguların bağlamsal olarak çözümlenmesini esas alan tarihsel analiz yaklaşımı benimsenmiştir. Çalışmanın örneklemini, Roma toplum yapısı, kadınların statüsü, Vesta Rahibeliği ve *Lex Oppia* yasasına ilişkin değerlendirmeler içeren akademik kitaplar, makaleler ve tez çalışmaları oluşturmaktadır. Bu doğrultuda araştırma, mevcut literatür üzerinden yürütülen bir inceleme niteliği taşımaktadır. Araştırmada veri toplama sürecinde doküman incelemesi yöntemi kullanılmıştır. Bu kapsamda, konuya ilişkin yazılı kaynaklar taranmış, elde edilen veriler belirli temalar etrafında sınıflandırılarak değerlendirilmiştir. Toplanan veriler, betimsel analiz yöntemi ile çözümlenmiştir. Analiz sürecinde, kadınların toplumsal konumu, kamusal alandaki görünürlükleri ve hukuki statüleri, sınıfsal yapı ve tarihsel bağlam içerisinde ele alınmış, karşılaştırmalı bir perspektifle yorumlanmıştır. Bu yaklaşım, Roma toplumunda kadınların konumuna ilişkin çok boyutlu bir değerlendirme yapılmasına olanak sağlamıştır.

BULGULAR

Sınıf Çatışmasında Kadınlar

Roma Toplumunda Sınıf Çatışması ve İffet Kültü

Cumhuriyet döneminde kadınların birlikte hareket ettikleri örgütlü protestoları büyük oranda uzun zamandır devam eden sınıflar arası çatışmaya yani *patricius* ile *plebs*lerin eşitlik mücadelesi etrafında şekillenmiş olduğunu görüyoruz (Bauman, 2024, s. 29). Kadınlarla ilgili özel hukuka ilişkin iki konu öne çıkıyordu: kadının “kocasının kızı gibi” olduğu *manus* (Kadının evlenerek kocasının ve ailesinin hakimiyeti altına girmesi) evliliklerindeki kadının aşağı statüsü ve boşanma meselesinde kadının dezavantajlı durumu. Her ne kadar bu iki konu özel alanı ifade etseler de bu konular tam anlamıyla siyasi olarak nitelendirilebilecek örgütlü eylemlere yol açmıştır. Roma toplumunun toplumsal yapısı, hukuki ve siyasi haklar bakımından belirgin sınıfsal ayrım üzerine kuruluydu. Bu yapı içerisinde Roma halkı; *patriciuslar*, *plebler* ve *köleler* olmak üzere üç temel gruba ayrılmaktaydı. Siyasal ve ekonomik gücü elinde bulunduran *patriciuslar*, geniş topraklara ve ayrıcalıklı yurttaşlık haklarına sahip olan soylu sınıfı temsil etmekteydi. Buna karşılık *plebler*, soylu sınıfının dışında kalan ve nüfusun büyük bölümünü oluşturan toplumsal kesimi meydana getiriyor; bu konumları sebebiyle vatandaşlık, siyasi temsil ve hukuk alanlarında çeşitli kısıtlamalara maruz kalıyorlardı. Özellikle *patriciuslarla* evlenme hakkından yoksun olmaları, sınıfsal ayrımın günlük yaşam üzerindeki somut yansımalarından birini oluşturmaktaydı. Roma toplumunun üçüncü ve en alt tabakasını meydana getiren köleler ise, herhangi bir siyasi hakka sahip olmayan ve ekonomik üretim sürecinde tamamen emek gücü olarak değerlendirilen bir grup olarak konumlanmaktaydı (Koçbey, 2023, s. 14). Romalılarda sosyal eşitsizliğin doğanın bir gerçeği olduğuna inanmışlardır. Bunun neticesinde vatandaşları yasalar vasıtasıyla, biri daha yüksek sosyal statülü *patricius* sınıfı diğeri de daha düşük sosyal statüye sahip *plebs* sınıfı olmak üzere ikiye ayırmıştır. Ailelerin en başta *patricius* statüsünü nasıl aldığı bilinmiyor, fakat bu muhtemelen Roma tarihinin başlarındaki kademeli bir süreç içerisinde gerçekleşmiştir. Söz konusu olan bu süreçte en zengin Romalılar, toplumun refahı ve güvenliği için dini seremoniler düzenleme gibi özel ayrıcalıkları olan seçkin bir sınıf olarak nitelendirilmişlerdir. Başta oluşturdıkları bu elit statüsünü Cumhuriyet’in erken dönemlerindeki sivil ve dini görevlerinde neredeyse tekel konumuna getirdi. *Patriciuslar* üstün statüleri ile gururla övünmüşlerdir (Martin, 2024, s. 54). Bu noktada asıl belirleyici olan, iki sınıf arasındaki mücadelenin MÖ 3. yüzyıla gelindiğinde ulaştığı aşama ve bu mücadelenin Roma’daki toplumsal ve siyasi yapıyı dönüştürücü etkisidir. Cumhuriyet döneminde, iki sınıf arasındaki ayrımın giderek kesinleşerek bir kutuplaşmaya evrilmesinde, Roma’nın genişlemesiyle birlikte artan ekonomik kaynaklar üzerindeki hakimiyet mücadelesi önemli bir rol oynamıştır. Bu süreçte, Roma toplumunda paylaşılan refahın yeniden dağıtımı konusunda yaşanan gerilimler, sınıflar arası çatışmayı daha görünür hale getirmiştir. *Pleblerin* zaman içerisinde bazı haklar elde edebilmesinde ise özellikle ekonomik açıdan güçlü *pleblerin* siyasi ve hukuki alanda etkinlik kazanma yönündeki talepleri belirleyici olmuştur (Dikiyol, 2021, s. 1027). Kadınsal erdemi temsil eden tanrıça *Pudicitia* (İffet), *patricius* ve *plebs* kadınlar arasında yoğun bir mücadelenin merkezi haline gelmiştir. Bunu şu örnek ile somutlaştıra biliriz Fabius Rullianus, Forum Boarium’da bir *Pudicitia Patricia* tapınağı kurdu. Tapınakta ibadet etme hakkı sadece bir kez evlenmiş (*patricius* kocalarla) *patricius* olarak doğmuş kadınlarla sınırlıydı. 296 yılında tapınak bir krizin merkezi oldu. Başarılı bir *plebs* olan Lucius Volumnius Flamma ile evlenmiş *patricius* bir kadın kendi sınıfının dışında bir evlilik yaptığı için tapınağa girilmesine izin verilmedi. O da Vicus Longus’taki evinde bir *Plebs İffet (Pudicitia Plebeia)*

sunacağı kurarak misilleme yapmıştır. Tüm *plebs* kadınlarını da bu iffet kültü de davet etmiştir. Yeni sunağı *patricius* muadilinden daha saygılı bir şekilde geliştirmelerine izin vermiştir. Livius’a göre kült sadece bir kez evlenmiş, iffetini kanıtlamış kadınlarla sınırlıydı ancak zaman içinde yozlaşmış kadınların kabul edilmesiyle kirlendi ve sonunda ortadan kayboldu. Hikaye özü itibarıyla doğrudur. *Patriciuslar* ve *plebsler* arasındaki evlilik şekli olan *conubium* (Roma hukukunda Roma yurttaşlarının sahip olduğu evlenme hakkı) konusunda harareti bir sorunun varlığını ortaya koymaktadır. Efsaneye göre bu mesele beşinci yüzyılın ortalarında büyük bir tartışma yaratmıştır (Bauman, 2024, s. 32).

İki sınıf arasında yaşanan bu vaka kadınlarında kendi içlerinde sınıfsal olarak ayrılık yaşadığını bizlere gösterir. Ancak bu süreç ilerleyen tarihlerde birlikte hareket ederek kamusal eylemlere sebebiyet vermeleriyle evrim yaşayacaktır.

Vesta Rahipliği

Roma dininde rahiplikler, siyasi makam ve himaye arasında kadınlar söz konusu olduğunda yakın bir ilişki vardı. Rahibelerin en önemli görevleri kurban ve duaydı. Vesta Bakireleri’nin dini programı hakkında Roma’daki diğer rahipliklerden daha fazla bilgiye hakimiz. Bunun en önemli sebebi eski dönemlerden beri kentin kaderi ve refahıyla çok yakından ilgili olmalarıdır. Vesta rahibelerinin Vesta Tapınağı’ndaki ebedi ateşten sorumlu olmaları, onların yalnızca dini değil, aynı zamanda sembolik bir devlet görevi üstlendiklerini göstermektedir. Bu bağlamda ebedi ateş, Roma’nın sürekliliğini temsil eden bir unsur olarak rahibelerin kamusal statüsünü meşrulaştıran bir araç işlevi görmüştür. Ebedi ateş kentin ve imparatorluğun kalıcılığını sembolize ediyordu. Bu bağlamda Romalılar ateşin sönmesinden korkmaktaydılar. Vesta rahibeleri, Roma devletinin rahibi *Pontifex Maximus* tarafından denetlenirken, Romanın en prestijli kurumlarından olan pontifex’e bağlıydılar. Vesta rahibeleri tam zamanlı din görevlileriydi. Külte en az 30 yıl hizmet etmek zorundaydılar (McClure, 2025, s. 426). Vesta rahibeliği seçiminde katı bir protokol vardı, pontifex bir kızın yaşını, yasal statüsünü ve fiziksel durumunu inceledikten sonra karar verirdi. Kızın 6 ile 10 yaşları arasında, sağlıklı bir zihne ve bedene sahip olması önemliydi aynı zamanda itibarsız bir mesleğe dahil olmayan, yaşayan özgür doğmuş iki vatandaşın meşru kızı olması gerekmektedir. Bekareti, dini kimliğinin ve rolünün ayrılmaz bir parçasıydı. Diğer saygın Romalı kadın ve kızların aksine, Vesta rahibesi neredeyse tamamen erkek otoritesinden bağımsızdı. Öz ailesi ile ilişkisi rahipliğe girdiği anda kopuyordu. Babasının gücünden kurtulan bir Vesta rahibesi bir kız evlat değildi, bir eş değildi aynı zamanda bakire olarak anne olamazdı. Antik Roma’da aile içerisinde kadına yüklenen anne kavramından artık çok uzaktır. Bu farklı yasal statüsü, onu geleneksel aile yapısından uzaklaştırıyorken Roma devletiyle yakından bağlıyordu. Bu durum Vesta rahibesinin ailesiyle bağının kopması sonucunda din üzerinden statü kazandığını bize göstermiştir. Babasının mülkünü miras alma hakkının yok olması, vesta rahibesinin tümüyle topluma ait olduğunun göstergesiydi (McClure, 2025, s. 427). Yuva tanrıçası, dolayısıyla aile koruyucusu olan Vesta Kültünde ebedi ateş bulunuyordu. Vesta Bakireleri olarak anılan rahibeler Vesta Kültünü gerçekleştirirdi; bunlar, tanrıçanın hizmetinde oldukları için otuz yıl cinsel ilişkiye girmemeye yemin etmiş altı tane bekar kadındı. En önemli sorumlulukları ebedi ateşin sürekli olarak yanmasını sağlamaktı. Eğer ateş sönerse Romalılar, Vesta Bakirelerinden birinin bakire kalmak üzere ettiği yemini bozduğunu düşünürdü. Vesta rahibesi sözünü bozduğu yönünde suçlu bulunursa, tıpkı canlı bir ceset gibi yer altındaki bir odaya gömülmek üzere bir cenaze yatağında taşınırdı ve bu odada etrafı taşlarla çevrilerek ölüme terk edilirdi. Bu şekilde ölüm ile cezalandırma Vesta rahibeleri üzerinde çok sık görülen bir ceza uygulamasıydı. Roma idari sistemi ve Roma devlet dini yakından ilişkiliydi. Daha önceden yapılan bir dini ritüel

tamamlanmadan hiçbir resmi işlem yapılamazdı (Martin, 2024, s. 39). Vesta rahibelerinin dini kimlikleri ile ritüellerdeki vazifelerini yerine getirerek verdikleri sözleri tuttukları doğrultuda Roma toplumunda statü elde ettiklerini görüyoruz.

Kamusal Yaşamda Kadın

Roma Devlet düzeninde kadınların toplumsal rolleri ağırlıklı olarak aile yapısı içinde tanımlanmış, kamusal alan ise büyük ölçüde erkeklere özgü bir alan olarak kurgulanmıştır. Bu çerçevede kadınların siyasal ve idari görevler üstlenmelerine izin verilmemiş; kamusal otoriteyle ilişkilendirilen makamlar erkek yurttaşlara mahsus kabul edilmiştir. Kadınlar halk meclislerinde oy kullanma, yargı organlarında görev alma ya da hukuki temsil yetkisiyle hareket etme gibi haklardan yoksun bırakılmıştır. Bu durum, kamusal görevlerin cinsiyete dayalı bir ayrılma tanımlamasının doğrudan bir sonucudur. Söz konusu sınırlamalar, Roma kamusal yaşamında erkek egemenliğinin kurumsallaşmasına zemin hazırlamış; kadınların toplumsal görünürlüğü belirgin biçimde sınırlandırmıştır. Kadınların kamusal alanda yer alamayacağına ilişkin genel kuralın istisnasını Vesta rahibeleri oluşturmaktaydı. Ancak bu ayrıcalık, aile yaşamından feragat etmeleri ve devlete yönelik bağlayıcı yeminler üstlenmeleri karşılığında elde edilmekteydi. İmparator ailesiyle birlikte kamusal törenlerde halkın karşısına çıkabilen Vesta rahibelerine bu nedenle özel bir kamusal statü tanınmıştır. Baba egemenliği ve vesayet ilişkilerinin dışında bırakılan rahibeler, vasiyetname düzenleyebilme ve mahkemelerde yeminsiz tanıklık yapabilme gibi haklara sahipti. Roma Devleti kadınlara doğrudan siyasal katılım imkanı tanımamış olmakla birlikte, özellikle üst sınıfa mensup kadınlar, eşleri ya da babaları aracılığıyla seçim alanlarında dolaylı bir görünürlük kazanabilmişlerdir. Kadınların Roma Devleti'ne yönelik ilk kapsamlı ve kolektif tepkisi ise, lüks harcamaları sınırlamak amacıyla yürürlüğe konulan Lex Oppia Kanunu'na karşı gelişen muhalefetle ortaya çıkmıştır (Erişgin, 2013, s. 22).

Roma İmparatorluğu Döneminde Kadınların Protestoları

II. Pön Savaşı ve Lex Oppia'nın Ortaya Çıkış Süreci

Hannibal'in askeri yetkinliğinin belirleyici olduğu II. Pön Savaşı sırasında (MÖ 218-202) çatışmalar İtalya topraklarına taşınmış ve Kartacalı komutan, Roma ordularını art arda ağır yenilgiler yaşatarak toplamda on binlerce askerin kaybedilmesine yol açmıştır. Buna rağmen Hannibal'in izlediği strateji uzun vadede amacına ulaşamamıştır. Zira Roma'nın müttefikleri, bazı kopuşlara rağmen, büyük ölçüde birliklerini korumayı başarmış ve bu dayanışma Roma açısından savaşın seyrini değiştiren bir unsur haline gelmiştir. Müttefiklerin bu tutumu, Hannibal için yenilginin kaçınılmaz hale geldiğini göstermekteydi. Uzun yıllar süren ve beklenen sonuçları vermeyen seferlerin ardından yıpranan Hannibal, nihayetinde Kartaca'ya geri dönmek zorunda kalmıştır. Ancak savaşın Roma üzerindeki etkileri yalnızca askeri alanda sınırlı kalmamış; özellikle psikolojik ve daha da önemlisi ekonomik açıdan son derece ağır sonuçlar doğurmuştur. Bu koşullar, Roma'da tasarrufa dayalı düzenlemelerin gündeme gelmesine ve kadınları doğrudan etkileyen sınırlayıcı uygulamaların hayata geçirilmesine zemin hazırlamıştır (Eco, 2021, s.75). Sonuç itibarıyla II. Pön Savaşı'nın sonunda (MÖ 215-201). Roma, Kartaca'nın askeri gücünü kırmış, İber Yarımadası'nın bir bölümünü ele geçirmiş ve Akdeniz'in batı kesiminde hakimiyet kurmuştur (Tellege-Couperus, 2023, s. 49). Hannibal'in 218 yılında İtalya'ya saldırısıyla birlikte, kadınların meselelerinde yeni bir dönem açılmıştır. Kadınlar, tümü daha önce farkın varılmamış olan ya da giderek artan etkileri daha önce fark edilmemiş birçok alanda önemli bir şekilde aktif olmaktadır. Her ne kadar anti-feminist düşüncenin buna yol açıp açmadığı bilinmese de 215 yılında

kadınlara belirli yasal kısıtlamalar getiren bir yasa çıkarılmıştır. *Plebs* tribunusu G. Oppius dini festivaller haricinde hiçbir kadının 14 gramdan fazla altına sahip olmalarını, mor giysiler giymelerini veya dini günler dışında kent içinde ya da kentin 1609 metreye kadar yakınında iki tekerlekli arabalara binmelerini yasaklayan *Lex Oppia* yasasını çıkardı (Bauman, 2024, s. 48). Yasanın amacı öncelikle ekonomik olsa da konuşmacı Cato, lüks arzusunu azarlayarak ve kadınlar için geleneksel Romalı iffet, itaat değerlerini teşvik ederek buna ahlaki bir hava katmıştır. II. Pön Savaşında kadınların artan servetine bir tepkiyi temsil ediyordu. Ancak gerçek ne olursa olsun, kadınlar *Lex Oppia*'yı Roma toplumundaki konumlarına yönelik aşırı bir hakaret olarak görmüş oldular (McClure, 2025, s. 422). Yasanın yalnızca kadınların lüks arzularına yönelik olmadığını dini günlerin dışında seyahat etmemelerine yönelikte bir kısıtlamanın getirildiği görülmektedir. Burada kadınların yine toplum içerisinde ön plana çıkmaması adına atılan bir adım olarak değerlendirilebiliriz.

Lex Oppia'nın Yürürlükten Kaldırılması

Bu eyleme geçmeden önce, seçkin kadınların içinde yaşadığı zenginlik ve statü sergileme kültürünü anlamak gerekmektedir. Cornelia mücevherlerinden çok çocuklarını göstermekten hoşnut olsalar da çoğu zengin Romalı kadın statülerini görünüşleriyle belirtme ihtiyacını ciddiye almaktadır. Ayrıntılı saç stilleri, pahalı giysiler ve pahalı mücevherler takma Roma toplumundaki yerlerini daha da somutlaştırıyordu. Bir bakıma *cultus* kavramıyla ifade edilen bu süslenme kadınların kamusal alandan yoksun oluşunun adeta bir telafisiydi (McClure, 2025, s. 419). MÖ 201'de Kartaca'ya karşı Roma zaferi, fethedilen topraklardan Roma'nın yönetici sınıfına bir zenginlik aşılmasını getirmişti ve böylelikle mali kısıtlamaların gerekliliği ortadan kalkmıştır. MÖ 195 yılında *Lex Oppia*'nın kaldırılması için bir öneri kabul edilmiştir, ancak veto ile bu engellenmeye çalışılmıştır. Bu olay Roma tarihindeki en büyük toplu kadın müdahalesine neden olmuştur, *Matrona* (Evli kadın ve Anne anlamındaki latince terim) evde kalmaya ikna edilememişlerdir. Livius, eserinin 34. Kitabını 215 yılında *Lex Oppia*'nın yürürlükten kaldırılmasıyla beraber gelişen dramatik olaylar ile başlar. 195 yılının *plebs* tribunusları olan M. Fundanius ve L.Valerius Yasanın yürürlükten kaldırılmasını önerdiler. Diğer iki tribuns Marcus Junius Brutus ile Publius Junius Brutus yasanın yürürlükten kaldırılmasına karşı çıktılar ve bu durumu engellemek için de tribuns vetosunu kullanmakla tehdit etmişlerdir. Ancak matronların sayısı oldukça fazlaydı ve Forum'a açılan tüm yolları kapamışlardır, kadın kalabalığının sayısı her geçen saniye daha da artmaktadır. Consullere ve memurlara başvurdular ancak Cato yasanın kaldırılmasına karşı çıkmaya devam etmekteydi (Bauman, 2024, s. 58). Livius'un aktardığına göre, Cato'nun yasanın yürürlükten kaldırılmasına karşı çıkan konuşmasını iddia etmektedir. Bu yasalar ile ilgili oylamalarda aktif rol oynayan ve kendisi de yasalar çıkaran Cato, consul olduğu 195'de, kadınların lükse yönelik harcamalarına kısıtlama getiren bir yasa olan *Lex Oppia*'nın yürürlükten kaldırılmasına karşı çıktı ve bu uygulamaya karşı sert bir konuşma yapmıştır. Lüks tüketimi engellemek amacıyla yirmi yaşından genç köleler, mücevherat, kadın elbiseleri ve araçlar gibi lüks eşyaya değerinin on katı üzerinden vergi başlattı. Her ne kadar halkın sempatisini kazansa da Cato'nun vergilendirme politikası ve diğer sosyal politikaları varlıklı ve nüfuzlu Romalıları rahatsız etmektedir (Bilik, 2024, s.1783-1784). Ancak kadınlar yasayı etkin bir şekilde yürürlükten kaldırır ve mücevherlerini takıp dans etmeye başlarlar.

Roma İmparatorluğu Döneminde Aile İçerisinde Kadın

Familia Kavramı ve Evlilik

Roma Ailesini tanımlamak kolay değildir. Sadece ebeveynler, çocuklar, köleler ve diğer mülklerden değil, aynı zamanda daha geniş akrabalıkları kapsayan, belirleyici özellikleri olmayan bir varlıktır. İngilizce aile (family) kelimesi ile Latince *familia*'dan gelse de bu terim modern anlamda çekirdek aileyi tanımlıyordu. Terimi anlamının bir başka yolu vardır. *Pater familias* etrafında gelişen bir dizi güç dinamiğine bakmak gerekmektedir. Karısı, yetişkin bile olsalar çocukları, torunları ve köleleri üzerinde mutlak güç sahibiydi. Baba dışında ailenin hiçbir ferdi için hukuki anlamda yetişkinlik mevcut değildi. Tüm mülklere sahipti ve aile adına karar verme yetkisi sadece ondaydı. *Pater familias* (Evin Babası veya efensi anlamındaki latince terim), tüm aile bireylerini, özellikle çocukları ve köleleri, yaşam ve ölümlerine karar verme yetkisini kullanmak dahil olarak disiplin altına alma hakkına sahipti. Vergina'nın öyküsünde babasının onu cinsel saldırıdan korumak için bu yetkisini kızını öldürerek kullandığını biliyoruz. *Pater familias*'ın ahlaki ve ekonomik sorumluluğu: Gelecek nesiller için mal varlığını yönetmek ve o zamana kadar çocukları onun kontrolündeydi, ölünceye kadar bağımsız olarak mülk sahibi olamazlardı. Karısının da aile üzerinde hiçbir yasal hakkı yoktu. Romalı ailenin yapısını belirlemede önemli faktör, evliliğin *manus* (Kadının evlenerek kocasının ve ailesinin hakimeyi altına girmesi anlamındaki latince terim) olup olmadığıydı. Gelin babasının kontrolünden kocasının kontrolüne geçiyordu ve artık babasının mirasından pay alamıyordu. Bu evlilik biçiminde kadın neredeyse hukuki anlamda kocasının kızı sıfatıyla işlev görüyordu. Sadece Cumhuriyet döneminde *manus* evlilikte eşe hitaben *mater familias* (ailenin annesi) unvanını almıştır. Ancak bu terim MÖ 1 yüzyıldan itibaren daha genel anlamı *matrona* (Hukuki olarak evli kadın anlamındaki latince terim) ile alternatif olarak kullanılmaya başlamaktadır (McClure, 2025, s. 303). *Manus* altına giren evli kadın, evlilikle birlikte kendi ailesiyle olan akrabalık bağlarını ve bu bağlardan doğan hak ile yükümlülüklerini yitirerek, tüm hukuki sonuçlarıyla kocasının ailesine dahil olmaktadır. Evliliğin kadını iki ayrı aileye birden bağlamaması ve tek bir aile yapısı içinde yer almasını zorunlu kılan unsurlardan biri de Roma'nın dini düzeniydi. Zira her Roma ailesi, kendine özgü bir dini gelenek ve ibadet pratiğine sahipti. Bu nedenle kadının aynı anda iki farklı dine bağlı kalması mümkün görülmemektedir. Kadın ya kendi ailesinin dini yapısı içinde kalır ya da bu bağı kopararak kocasının dinini ve ibadet biçimini benimserdi. Kocasının egemenliği altına giren kadının hem mal varlığı hem de şahsi hukuk düzeni bakımından kocasına bağlı hale gelmekteydi. Egemenlik ilişkisiyle birlikte kadın, mevcutsa hak ehliyetinde kaybetmekteydi. Bu sebeple *manus* altına giren bir kadının, kocasından bağımsız bir mal varlığına sahip olması söz konusu değildi. Bununla birlikte *manus* ilişkisinin sone ermesi durumunda, kadının kendi malvarlığını talep etme hakkı varlığını korumaktaydı. Üzerinde *manus* kurulan ve *pater familias*'ın eşi konumunda bulunan kadın, saygı ifadesi olarak *mater familias* unvanıyla anılmaktaydı. Ancak bu unvan, hukuki bir statüyü değil, yalnızca toplumsal bir onur ifadesini temsil etmekteydi. Nitekim *mater familias*, hukukî bir kavram, bir statü değil; sadece bir onur ifadesiydi. Çünkü, *mater familias* da hukuk düzeni açısından *pater familias*'ın kızı konumunda kabul edilmekte ve kendi çocuklarıyla eşit bir hukuki statüde değerlendirilmektedir (Erişgin, 2013, s. 3). Kadınların özgürleşme sürecinin Roma toplumunda belirli ölçülerde ilerlemiş olması ilk bakışta şaşırtıcı görünse de, Roma'nın dış politika tercihleri ve özellikle II. Pön Savaşı ile başlayan uzun süreli savaşlar bu süreci doğrudan etkilemiştir. Yaklaşık iki yüzyıl boyunca kesintisiz biçimde devam eden askeri seferler, toplumsal yapıda önemli dönüşümlere yol açmış; Roma'nın yayılmacı politikası sonucunda erkek nüfustaki

azalma, kadınlar ile erkekler arasındaki ilişkilerin yeniden şekillenmesine neden olmuştur. Savaşlarda babalarını ve eşlerini kaybeden çok sayıda kadın hukuken ve fiilen bağımsız hale gelirken, ailelerindeki erkek üyeleri hayatta olan kadınlar dahi, malvarlığının ve gündelik işlerin idaresinde giderek daha belirleyici bir konum üstlenmek zorunda kalmıştır. Dolayısıyla Roma'nın emperyalizmi kadınların durumu üzerinde de etkili olmuştur (Eco, 2021. s. 353). Antik Roma, erkeklerin kadınların üzerinde sistemli ve kurumsallaşmış bir tasarruf hakkına sahip olduğu, kadının aile içerisindeki rolünün buna göre belirlendiği, erkek egemen bir toplumdur. Kadının toplum hayatındaki yerine ilişkin günümüze ulaşan bilgi kaynaklarının ve bu bilgilere erişilebilen eserlerin, dönemin erkekleri tarafından yazılmış olduğu göz ardı edilmemelidir. Bu kaynaklarda geçen kadınlar, daha çok Roma şehrinde yaşayan ve ailesi üst sınıfa mensup, varlıklı ailelerin kızlarıdır. Alt sınıfa mensup kadınların özellikle eğitimlerine dair bilgiler ise, son derece kısıtlıdır. Tarım toplumu olan Antik Roma'da kırsal kesimde yaşayan kadınlar ise, evin dışında üretime katıldıkları oranda sosyal yaşamın içerisinde bulunabiliyorlardı. Nitekim Roma tarihinde ismi geçen kadınların büyük bir kısmı, birey olarak değil, bir eş, kız kardeş ve özellikle anne rolü olarak toplum içinde yer bulmaktadırlar. Romalı kadın için önemli olan, kadına ait hukuki bir hakimiyetten çok, bu hakimiyete ve güce sahip olan erkek üzerindeki gayri resmi güç ve dolaylı yoldan elde ettiği geçici iktidarının en güçlü ve inandırıcı gerekçesi olan çocuklarını koruyan anne rolüdür. Kadınlar kişilikleri el verdiği oranda kamusal alana etki edebiliyorlar, bir *Senatus* üyesinin, İmparatorun eşi ya da annesi olarak mevki ve önem kazanmaktadırlar (Söğüt, 2025, s. 104).

Kadının Hukuki Durumu

Romalı kadınların hukuk düzeni içerisinde bağımsız biçimde hukuki işlem yapma yetkileri bulunmamaktaydı; bu nedenle davalarda ancak kendileri için atanmış vasiler aracılığıyla taraf olabiliyorlardı. Küçük yaşta ve çoğunlukla yeterli bir eğitim almadan evlendirilen, evlilik sonrasında da kocasının himayesi altında yaşamını sürdüren kadınlar, içinde bulundukları yaşam koşulları ve bastırılmış toplumsal konumları sebebiyle hak arama, kendini ifade etme ya da savunma konusunda sınırlı bir hareket alanına sahipti. Roma hukukuna göre kadınların miras hakkı tanınmış olmakla birlikte, bu hak çocuklarına miras bırakabilme imkanını kapsamamaktaydı; ayrıca hukuki işlem yapma ehliyetleri de önemli ölçüde sınırlandırılmıştır. Kız çocukları gibi evli kadınlar da fiili ehliyetlerinin kısıtlı olması nedeniyle malvarlıklarının yönetimi konusunda bir vasiye ihtiyaç duymaktaydılar. Bu durum, Roma hukuk geleneği içerisinde önceden belirlenmiş ve kuşaktan kuşağa aktarılan bir uygulama olarak kabul edilmekteydi. Bu çerçevede, kadınların malvarlıklarının güvence altına alınması, hukuki işlemlerinin sağlıklı biçimde yürütülmesi ve eksik kabul edilen fiil ehliyetlerinin tamamlanması amacıyla kendileri adına bir vasi görevlendirmektedir. Kadının *manus* usulüyle evli olması ve *pater familias* konumundaki eşinin vefatı halinde ise, vesayet görevi soy bağı içinde en yakın erkek akrabaya verilir; bu kişi öncelikle oğlu, bunun mümkün olmadığı durumlarda ise amcası olurdu. Roma'nın erken dönemlerine kadar uzanan bu vesayet uygulamasının temel hedefi, aileye ait malvarlığının korunması ve söz konusu malların aile dışına çıkmasının önlenmesiydi (Özkan, 2017, s. 17-18). Evlenen bir kadının, kocasının ya da onun aile babasının egemenliği altına girmemesi durumunda, kocasının ailesine dahil olmadığı görülmektedir. Bu durumun doğal sonucu olarak kadın, ne eşiyle ne de çocuklarıyla arasında hukuk düzeni bakımından bağlayıcı nitelik taşıyan ilişkiler kurabilmekteydi. Söz konusu hukuki kopukluk, özellikle miras hukuku açısından belirleyici sonuçlar doğurmaktaydı. Roma toplumunda kadınlar, bir aile reisinin hakimiyeti altında bulunduklarında ise, erkekler gibi birey statüsünde vatandaş olarak kabul edilmemiş; vatandaşlık kavramının sağladığı haklardan cinsiyetleri

sebebiyle doğrudan yararlanamamışlardır (Palaz Erdemir, 2016, s. 9). Kadınlar ile erkekler arasındaki bu farklılığın somut biçimde gözlemlenebildiği bazı örnekler bulunmaktadır. Metnin önceki bölümlerinde ele alınan *Lex Oppia* yasasına karşı kadınların gösterdiği tepki, bu durumu açık biçimde ortaya koymaktadır. II. Pön Savaşı'nın yol açtığı ekonomik sıkıntıları nedeniyle lüks tüketimi sınırlandırmak amacıyla çıkarılan *Lex Oppia*, savaş sona ermesine rağmen yürürlükte kalmaya devam edince kadınlar arasında ciddi bir hoşnutsuzluk yaratmıştır. Siyasal yetki ve karar alma mekanizmalarına doğrudan katılamayan Romalı kadınlar, söz konusu yasanın kaldırılmasını sağlamak için Forum'da bir araya gelerek Senato üzerinde etkisi bulunan erkeklere taleplerini iletmışlerdir. Bu girişimlerin ardından Senato'nun yasayı yürürlükten kaldırma yönünde karar alması, soylu ailelere mensup kadınların vatandaş olarak kabul edilmelerine karşın, kendilerini doğrudan ilgilendiren konularda yasama ve yürütme süreçlerinde yetki sahibi olmadıklarını açık bir göstergesi niteliğindedir. Roma'da vatandaş statüsü tanınan sınırlı sayıdaki soylu kadın siyasi, idari, iradi ve hukuki alanlarda erkek vatandaşların sahip olduğu haklardan fiilen yararlanamamıştır. Romalı kadınların kamusal alandaki konumlarının erkeklere kıyasla oldukça dar bir çerçevede kalması, onların tam anlamıyla vatandaş olarak algılanmadıklarını göstermektedir. Bu nedenle soya dayalı bir sınıf ayrımının mevcut olduğu Roma toplumunda, buna ek olarak cinsiyete dayalı bir ayrımın da varlığından söz etmek gerekmektedir. Bu durumun sonucu olarak, zekaları, yetenekleri ve etkileriyle öne çıkan bazı kadınlar, Roma siyasetinde doğrudan yer alamadıkları için, eşleri, babaları ya da erkek kardeşleri gibi aynı hane içinde bulundukları erkek üzerinde etkide bulunarak, siyasal, idari ve hukuki süreçlerde dolaylı bir rol üstlenmişlerdir (Palaz Erdemir, 2016, s. 18-19).

SONUÇ VE TARTIŞMA

Çalışmada elde edilen bulgulara göre, Roma Cumhuriyet Dönemi'nde kadınların toplumsal konumları büyük ölçüde sınıfsal yapı ve aile düzeni tarafından belirlenmektedir. *Patricius* ve *plebs* ayrımının yalnızca toplumsal yapı içerisinde değil, kadınlar arasında da etkili olduğu ve bu durumun kadınlar arasında bir ayrışmaya yol açtığı görülmektedir. Bununla birlikte, bu ayrışmanın ilerleyen süreçte kadınların birlikte hareket etmelerine engel olmadığı anlaşılmaktadır. Kadınların kamusal alandaki varlıklarının sınırlı olduğu, siyasal ve idari görevlerde yer alamadıkları ve kamusal otoritenin büyük ölçüde erkek egemen bir yapıya sahip olduğu tespit edilmiştir. Ancak Vesta Rahibeleri örneğinde olduğu gibi bazı kadınların dini görevler aracılığıyla kamusal alanda istisnai bir statü elde edebildikleri görülmektedir. II. Pön Savaşı sonrasında yürürlüğe giren *Lex Oppia* yasasının, kadınların ekonomik ve toplumsal yaşamlarını sınırladığı buna karşılık kadınların bu yasaya yönelik kolektif bir tepki geliştirerek kamusal alanda protestolarda bulundukları ve yasanın kaldırılması sürecinde etkili oldukları belirlenmiştir. Aile yapısı içerisinde *pater familias* otoritesinin belirleyici olduğu; kadınların hukuki statülerinin sınırlı kaldığı ve çoğu durumda bir erkek vesayeti altında değerlendirildikleri görülmektedir.

KAYNAKÇA

- Bauman, R. A. (2024). *Antik Roma'da kadınlar ve politika* (B. Okay, Çev.). İstanbul: Liberus.
- Bilik, N. (2024). Cato ve Roma muhafazakârlığı. *Vakanüvis: Uluslararası Tarih Araştırmaları Dergisi*, 9(Özel Sayı), 1779–1809.
- Çığır Dikiyol, D. (2021). Antik Roma'da bir statü göstergesi olarak eğitim. *Dokuz Eylül Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 23(3), 1025–1051.
<https://doi.org/10.16953/deusosbil.857266>
- Eco, U. (Ed.). (2021). *Antik Roma* (L. T. Basmacı, Çev.). İstanbul: Alfa Yayınları.
- Erdemir, H. P. (2016). Roma vatandaş hukukunun konusu olarak kadın. *Tarih Dergisi*, 63(1), 1-26.
- Kocakuşak Koçbey, F. (2023). *Epigrafik kaynaklar ışığında antik Roma'da kadın köleler ve azatlı kadınlar arasındaki "mater familias" örnekleri* (Doktora tezi). Bursa Uludağ Üniversitesi.
- Martin, T. R. (2024). *Antik Roma: Romulus'tan Iustinianus'a* (S. Özgüler, Çev.). İstanbul: Bilge Kültür Sanat.
- McClure, L. K. (2025). *Klasik antikitede kadınlar: Doğumdan ölüme* (G. Günata, Çev.). İstanbul: Koç Üniversitesi Yayınları.
- Özkan, E. B. (2017). Yasalar ve gelenekler ışığında arkaik ve klasik dönem Yunan ve Cumhuriyet dönemi Romalı kadınların aile hayatı. *İstanbul Üniversitesi Kadın Araştırmaları Dergisi*, 2017(2), 1–25.
- Söğütlü Erişgin, Ö. (2013). Roma toplumunda kadının konumu. *İnönü Üniversitesi Hukuk Fakültesi Dergisi*, 4(2), 1–31.
- Söğüt, İ. S. (2025). Cumhuriyet ve ilk imparatorluk dönemleri antik Roma'sında kadınlık ve erdem. *Dokuz Eylül Üniversitesi Hukuk Fakültesi Dergisi*, 27(1), 101–139.
<https://doi.org/10.33717/deuhfd.1641135>
- Tellegen-Couperus, O. (2023). *Roma hukuku: Kısa bir tarih* (S. Ünver, Çev.). İstanbul: Zoe Kitap.

Tedarik Zinciri Yönetiminde Radyo Frekanslı Tanımlama Sistemlerinin Kullanımı

Hakan KILCI¹

¹E-mail: hkilci@nku.edu.tr; Namık Kemal Üniversitesi, Sosyal Bilimler Meslek Yüksek Okulu , Yönetim ve Organizasyon Bölümü, Tekirdağ / Türkiye.

Özet

Yenilikçi teknolojik cihazlar, operasyon ve kalite iyileştirmeleri arayan birçok kuruluş arasında popülerlik kazanmıştır. Tedarik zinciri yönetiminde (TDY) bazı teknolojilerin kullanımı süreçlerin hızını artırabilir, doğruluğu iyileştirebilir ve bilgi depolamayı kolaylaştırabilirken, diğerleri ürün görünürlüğü, envanter ve işçilik maliyetlerinde azalma sağlayabilir. Bu araştırma TZY’de Radyo Frekans Tanımlama Cihazı (RFTC) entegrasyonuna ilişkin kuramsal bir değerlendirme sunmaktadır. RFTC, kuruluşların tedarik zinciri faaliyetlerinin ve küresel rekabet yetkinliklerinin etkin yönetimi için faydalı bir araçtır. Araştırmada daha önce Radyo Frekanslı Tanımlama Sistemleri (RFTS) kullanımına bağlı olarak ortaya çıkan performans ve uygulamaları da göz önüne alarak RFTS kullanımının olası alanlarını ve faydaları alınmıştır. RFTC teknolojisinin benimsenmesi ve kullanımı sırasında belirlenen önemli sorunlar olduğu kadar, bazı TZ üyesi işletmeler tarafından öne sürülen itici faktörlerin de dikkate alınması sağlanmıştır. Araştırmada birçok işletmenin TZY’nin RFTC entegrasyonu ile ilgili çeşitli yaklaşımları ve endişeleri sunulmuştur. Bu durum RFTC 'nin tedarik zinciri yönetimi üzerindeki etkisi, durumu ve gelecekteki yönü hakkında anlamlı sonuçlar çıkarmaya yardımcı olacak unsurlardan biridir.

Anahtar Kelimeler: 3 ile 5 kelime olacak şekilde çalışmanızı en iyi ifade eden kelimeleri alfabetik sıralamayı dikkate alarak yazınız.

Abstract

Innovative technological devices have gained popularity among many organizations seeking operational and quality improvements. In supply chain management (SCM), the use of some technologies can increase process speed, improve accuracy, and facilitate information storage, while others can provide product visibility, inventory, and labor cost reductions. This research presents a theoretical assessment of Radio Frequency Identification (RFID) integration in SCM. RFID is a useful

tool for the effective management of organizations' supply chain activities and global competitive capabilities. The research considers the potential areas and benefits of RFID use, taking into account performance and applications that have emerged from previous RFID use. It also considers key challenges identified during the adoption and use of RFID technology, as well as the driving factors put forward by some SCM member businesses. The research presents various approaches and concerns of many businesses regarding RFID integration in SCM. This is one of the elements that will help draw meaningful conclusions about the impact, current status, and future direction of RFID on supply chain management.

Keywords: RFID technology, RFID integration, Supply Chain Management, Performance Improvement.

GİRİŞ

Bu araştırmanın amacı TZY’de RFTS’nin kullanımı ve sistemin faydalarını kuramsal bağlamda ele almaktır. Araştırmada literatür taraması ile RFTS’nin kullanım tarzı, büyük işletmelerde kullanımı, faydaları, sakıncaları ve kullanım teknolojisi hakkında kuramsal olarak daha önceki araştırmalar rehberliğinde bilgi verilmeye çalışılmıştır. Son dönemlerde birçok işletmenin tedarik zinciri tasarımı sadece ürünlerin etiketlenmesi değil aynı zamanda araç takibi, konteyner takibi, internet nesneleri (Internet of Things), ürünlerin taşınması ve depolanması süreçlerindeki durumlarının kontrol edilmesi vb. alanlarda RFTS’nin sıkça kullanılmaya başlaması konunun önemini göstermektedir.

Bilgi teknolojisi, tedarik zinciri yönetimi (TZY) içindeki malzeme ve bilgi akışındaki genel artış nedeniyle şirketlerin karşılaştığı tedarik zinciri sorunlarına etkili bir çözüm olarak görülmeye başlamıştır (Huddiniyah ve Er, 2019). Günümüzde şirketler, iş süreçlerini yeniden tasarlamaya ve rekabetçi ürün ve hizmetler geliştirmeye yönelmiştir. Değişim, geçmişte ne kadar başarılı olursa olsun, herhangi bir işletmenin yaşam döngüsünün kaçınılmaz bir bileşeni haline gelmiştir (Ahmed ve Kouba, 2013). Piyasanın küreselleşmesi, en kaliteli ürün ve hizmetlerin sağlanmasında rekabeti daha da artırmıştır. Buna göre, müşterilerin memnuniyeti ve talepleri hem yerel hem de küresel pazarda karlı bir şekilde gelişmeye yönelik fırsatları sunarken, bu fırsatlardan istifade edebilmek için yeni TZY teknolojilerinin uygulanması da gerekmektedir (Hu ve Haddud, 2017). Müşteriler sadece bir ürün veya hizmet değil, bir deneyim de satın almaktadırlar (Wu ve Zhu, 2017). Bu nedenle, iyi bir ürün veya hizmet, daha önce yaşanmış kötü bir deneyimi kolayca telafi edemez. Tedarik zinciri yönetiminde yaşanan büyük hayal kırıklıklarının çoğu, geç teslimattan kaynaklanabilir. (Han ve diğ., 2017).

2. RFTS Teknolojisi

Radyo Frekanslı Tanımlama Cihazı (RFTC) sistemleri, otomatik tanımlama ve veri yakalama cihazları olarak sınıflandırılan bir teknoloji grubuna aittir. RFTC teknolojisi, bilgisayarların uzaktan elektronik etiketlerin ayırt edici özelliklerini çözmesine olanak tanıyan kablosuz bir iletişim sistemidir (Nath ve diğ., 2006). Teknoloji temelde iki nesne arasında radyo dalgaları veya sinyaller göndererek çalışır. Sistemde teknik olarak, bir okuyucu ve bir etiket bulunur. Bu nedenle, etkinleştirici özelliği olan bir teknoloji olarak kabul edilir (Yusof ve Saman, 2016). Hava kargo operasyonlarında ve konsolidasyon faaliyetlerinde uygulanan lojistik süreçler, RFTS teknolojisinin tipik bir uygulama alanıdır. RFTS bir depoda gerçekleşen yük alımı, güvenlik kontrolü ve yük depolamasından, havaalanında uçağa binmeye kadar uzanan hava kargo lojistik süreçlerindeki kalite süreçlerini ele almak için kullanılmaktadır (Giust ve diğ., 2019). Yanlış stok yönetimlerinin yol açtığı sorunlar, işletmelerin belirlediği hedeflere ulaşmasını engelleyebilir ve müşterilerin beklentilerini karşılayamamasına neden olabilir. Bu zorlukların üstesinden gelmek, tedarik zinciri yönetiminin depolama ve envanter yönetimlerinde RFTS stratejilerini uygulamasının ayrıntılı bir şekilde ele alınmasını gerektirebilir (Cui ve diğ., 2017).

3. Literatür Taraması

Shin ve Ekşioğlu (2014), ürünlerin stokta kalma gün sayısını azalttığı gerçeğine rağmen, RFID'nin benimsenmesinin tedarik zinciri yönetiminde karlılığa katkıda bulunup bulunmadığının henüz bilinmediğini ortaya koymuştur. Ngai ve Gunasekaran (2009)'a göre RFTS teknolojisi giderek önem kazanmakta ve iş, üretim, imalat ve lojistik sektörlerinde kullanılmaktadır. Bununla birlikte, RFTS teknolojisi henüz tam olarak gelişmiş değildir. Makalede, endüstriyel uygulamalarda RFTS teknolojisinin kullanımında karşılaşılan bazı sorunları ve zorluklar incelenmiş ve daha fazla araştırma için zorlukları ve sorunları ele alan bir yol haritası sunulmuştur. Nayak (2019), bu teknolojinin benimsenmesindeki itici faktörlerin envanter yönetimi ve bilgi doğruluğu; izlenebilirlik verimliliği, zaman ve işçilik maliyetlerinde azalma; kayıp ve hırsızlığın önlenmesi ve ürün görünürlüğü olduğunu belirtmektedir.

Peppa ve Moschuris (2013), RFTS teknolojisinin tedarik zinciri yönetimindeki etkileri üzerinde çalışmıştır. Araştırmacılar, bir RFTS'nin temel işlevinin süreçleri, insanları ve ürünleri tanımlamaya, uyarmaya, izlemeye, doğrulamaya ve konumlandırmaya yardımcı olmak olduğunu göstermektedir. Leung ve diğ. (2014), RFTC teknolojisinin, anlık gerçek tedarik zinciri algılanabilirliği sunarak tedarik zinciri yönetimini dönüştürme vaadini taşıdığını belirtmiştir. Çalışmada altı ayrıntılı vaka çalışmasının sonuçları raporlanmıştır. Vaka çalışmaları neticesinde işletmelerin genellikle tedarik zinciri

stratejileriyle uyumsuz RFTS uygulamalarını iyice ön hazırlık yapmadan benimsediklerini bu durumun da istenilen fayda düzeyinin sağlanamaması sonucunu getirdiğini göstermiştir.

Shin ve Ekşioğlu (2014), ürünlerin stokta kalma gün sayısını azalttığı gerçeğine rağmen, RFID'nin benimsenmesinin tedarik zinciri yönetiminde karlılığa katkıda bulunup bulunmadığının henüz bilinmediğini ortaya koymuştur.

Lee ve diğ., (2019) RFTS teknolojisinin diğer yönlerinde çalışmaya devam eden birçok araştırmacının çabasına atıfta bulunmaktadır. Bu çalışmada bu tür yayınların önemli bir kısmı incelenmiştir. Makale esasen RFTS teknolojisindeki son araştırma çabalarının özetinin eksikliğinden kaynaklanan boşluğu doldurma girişimidir. Tedarik zinciri yönetiminin çoğu yönünde RFTS şemalarını gözden geçirirken genel kullanımı göz önünde bulundurarak, makale son yedi yılda RFTC teknolojisinin tedarik zinciri yönetimine uygulanmasının olası faydalarına, temel sorunlarına ve finansal etkisine odaklanmaktadır. Yazarlar, RFTC teknolojisinin tedarik zinciri yönetimi üzerindeki araştırmasına ilişkin zorluklar ve belirsizliklerin yanı sıra faydaları da detaylandırmaya çalışmaktadır. Makale ayrıca, tedarik zinciri sektöründe RFTS'nin olası gelecekteki eğilimlerini ve perspektiflerini tahmin etmektedir (Tran ve diğ., 2019).

Berquist ve Vanhatalo (2020) yaptıkları araştırmada tren vagonlarının içlerine ,vagonla taşıma esnasında demir cevheri peletlerinin maruz kaldıkları fiziksel etkileri özellikle ivme artışlarını ve sıcaklık değişimlerini ölçmek için, RFTS transponderleri yerleştirdiler. Araştırmanın birincil faydası taşıma esnasında yüksek stres noktalarının belirlenmesinde RFTS'nin kullanılması vasıtasıyla taşıma süreçlerini bu duruma göre planlamak olmuştur.

Nayak (2019), bu teknolojinin benimsenmesindeki itici faktörlerin envanter yönetimi ve bilgi doğruluğu; izlenebilirlik verimliliği, zaman ve işçilik maliyetlerinde azalma; kayıp ve hırsızlığın önlenmesi ve ürün görünürlüğü olduğunu belirtmektedir.

Peppa ve Moschuris (2013), RFTS teknolojisinin tedarik zinciri yönetimindeki etkileri üzerinde çalışmıştır. Araştırmacılar, bir RFTS'nin temel işlevinin süreçleri, insanları ve ürünleri tanımlamaya, uyarmaya, izlemeye, doğrulamaya ve konumlandırmaya yardımcı olmak olduğunu göstermektedir. Bu görüş, kavram üzerine daha önceki bir araştırma sonuçlarıyla da uyumludur (Mall ve Mishra, 2012). Sonraki araştırmacılar da RFTS teknolojisinin birçok üretim, imalat ve dağıtım operasyonundaki uygulaması üzerinde ayrıntılı çalışmalar yapmıştır (Roselli, 2014). RFTS, büyük ölçüde bilgi erişiminin

doğruluğunu artırma ve hızlandırma potansiyeline sahiptir (Lopez ve diğ., 2018). Günümüzde RFTS, birçok sektörde yaygın olarak kullanılmaktadır ve uygulamaları çok sayıda ve geniş kapsamlıdır.

4. Tedarik Zinciri Yönetiminde RFTS'nin Potansiyel Faydaları

Doğru şekilde uygulanan bir RFTS, işletmelerin tedarik zincirleri için çok sayıda fayda sağlayabilir (Nash, 2010). Bu teknoloji, tedarik zinciri yönetimine çeşitli destekler sunabilir. RFRC örneğin, ürün tanımlamayı, sorunsuz iletişimi ve bilgiye erişimi aynı anda geliştirebilen yenilikçi araçlar sunmaktadır (Masum ve diğ., 2013; Saraç ve diğ., 2010). Tsai ve Tsang (2012), RFTS'nin gerçek zamanlı olarak gerekli bilgilerin alışverişini kolaylaştırabileceğini ve tedarik zinciri üyeleri arasında iyi iletişimi güçlendirmeye yardımcı olabileceğini öne sürmektedir. RFTS, verileri uyumlu hale getirebilir ve hem fiziksel malların hem de materyallerin tedarik zinciri boyunca sorunsuz akışını sağlayabilir; bu akış, üreticilerden, toptancılardan ve perakendecilerden başlayarak devam edebilir. Akış, nihai müşteri veya tüketici memnuniyeti sağlanana kadar devam edebilir (Nash, 2010). Özünde, RFTS hem envanter doğruluğunu artırmaya hem de envanter zaman tüketimini azaltmaya yardımcı olur. Finley'e (2014) göre, envanter sayımına yönelik mekanik yaklaşımlar zahmetli ve yıpratıcı olabilir. Sadece zaman alıcı değil, aynı zamanda yanlış sayım ve kayıt nedeniyle yanıltıcı da olabilir.

Birçok araştırmacı, RFTS'nin ileri lojistikte önemli bir rol oynadığını öne sürüyor. Özellikle, depolama kontrolü ve yönetimi, diğer faktörlerin yanı sıra, ileri tedarik zincirlerinin yanıt verme hızını ve maliyet verimliliğini artırmaya katkıda bulunuyor. Ayrıca, teknoloji ürün görünürlüğünü sağlıyor ve müşteri hizmet seviyelerini artırarak ters lojistikte teslim süresini kısaltıyor (Usama ve Ramish, 2020). Bununla birlikte, Hinkka'nın (2012) bakış açısına göre, RFTS tedarik zinciri yönetimi uygulamasında karşılaşılan farklı zorluklar ve engeller birbirleriyle ilişkilidir. Yazar, daha pahalı teknoloji satın almanın ve dış uzmanlardan yardım almanın teknolojik sorunların çoğunu çözebileceğini açıklıyor. Dahası, Yusof ve Saman (2016), işletmelerin teknolojiyi iyice incelemesi, süreçleri yeniden tasarlaması, uygun uygulamalar geliştirmesi ve RFTS teknolojisini kullanmadan ve tedarik zinciri yönetimindeki malzemelere ve ürünlere etiket yerleştirmeden önce dikkatli bir pilot test yapması gerektiğini öne sürdü. Rekabet güçlerini artırmak için RFTS sistemlerini uygulamayı planlayan işletmelerin sayısı giderek artmaktadır. (Ting ve diğ., 2013).

SONUÇ VE TARTIŞMA

Bu araştırmada RFTS teknolojisinin TZY'deki durumu ve entegrasyonu önemli ölçüde ele alınmıştır. Tedarik zinciri yönetimi şeması, malların ve hizmetlerin menşeyden başlayarak bazı ara merkezlerden geçerek nihayetinde tüketicilere kadar olan akışının planlanması ve kontrolünden oluşmaktadır. Buna göre, bu araştırmada TZY düğümlerinin çoğunu kapsayan araştırma yayınları eleştirel bir şekilde incelenmiştir. Günümüzün küreselleşme ve hızlı teknolojik gelişmeler çağı, işletmelerin geleneksel çalışma biçimini kaçınılmaz olarak etkileyen birçok yeniliğe yol açmıştır. Bu tür değişikliklerle birlikte, işletmeler varlıklarını sürdürmek ve kar üretmeye devam etmek için trendlere ve küresel taleplere ayak uydurmaya eğilimlidir. RFTS'nin tedarik zinciri yönetiminde devrim yaratmaya devam ettiğini ve uygun tasarım ve uygulama ile herhangi bir işletmenin karlılığına katkıda bulunabileceği söylenebilir. Teknoloji bu kadar hızlı ilerlemeye devam ederse, "tam" otomasyon nedeniyle tedarik zincirinde çalışan personel sayısında ciddi azalmalar da yaşanacaktır. Bu bağlamda ele alınan RFTS'nin tedarik zinciri yönetimindeki durumu ve entegrasyonu konunun önemini anlamaya yardımcı olacaktır. Bu çalışmada eleştirel olarak analiz edilen ve sunulan araştırma sonuçları dikkate alındığında, RFTS'nin tedarik zinciri yönetimine entegrasyonu mevcut ve yeni ortaya çıkan işletmeler için önemli faydalar oluşturma potansiyeli şüphe götürmez. RFID teknolojisinin benimsenmesi ve kullanımı sırasında belirlenen önemli sorunlar ve zorluklar olsa da bu araştırmada birçok kullanımı faydaları görülmüştür. Bu araştırmada işletmelerin tedarik zinciri yönetiminde RFTS uygulamasına ilişkin çeşitli yaklaşımlar ve endişeler, gelecekteki araştırmacılara ve kuruluşlara en iyi seçim yolunda daha fazla rehberlik etmesi amaçlanmıştır. Son olarak işletmelerin depo tesislerinin performansını iyileştirmede RFTS kurulumunun sağlam ve kapsamlı bir şekilde araştırılmasını öneriyoruz, çünkü birçok işletme TZY performanslarının iyileştirilmesine bu sistemden faydalanabilir.

KAYNAKÇA

Ahmed, S.Z.F. and Kouba, M.B. (2013). Core Competencies and Phases of the Organisational life cycle, International Journal of Business and Management Studies, 5(1), pp. 461-473.

Bergquist, B., Vanhatalo, E. (2020), In-situ measurement in the iron ore pellet distribution chain using active RFID technology, Powder Technology, 361, pp. 791 – 802.

Cui, L., Deng, J., Liu, F., Zhang, Y. and Xu, M. (2017), Investigation of RFID investment in a single retailer two supplier supply chain with random demand to decrease inventory inaccuracy, Journal of Cleaner Production, 142, pp. 2028 – 2044.

Finley, J. (2014). 5 Benefits of Using RFID in Manufacturing and Supply Chain Management. Bu internet sitesinden erişilmiştir: <http://sickusablog.com/5-benefits-of-using-rfid-in-manufacturing-and-supply-chain-management/> [Erişim Tarihi: 04.05.2026].

Giust, I., Cepolina, E. M., Cangialos, E., Aquaro, D. Caroti, G. and Piemonte, A., (2019), Mitigation of Human Error Consequences in General Cargo Handler Logistics: Impact of RFID Implementation, Computers & Industrial Engineering, 137, 106038

Han, S., Zhao, L., Chen, K., Luo, Z-W and Mishra, D. (2017), Appointment scheduling and routing optimization of attended home delivery system with random customer behaviour, European Journal of Operational Research, 262, pp. 966 – 980.

Hinkka, V. (2012). Challenges for Building RFID Tracking System Across the whole Supply Chain. International Journal of RF Technologies: Research and Applications, 3(1), pp. 201-218.

Lee, C., Li, C. Cheng, C. and Lai, Y. (2019), A Novel Group Ownership Transfer Protocol for RFID Systems, Ad Hoc Networks, 91, 101873.

Leung, J., Cheung, W. and Chu, S. (2014), Aligning RFID Applications with Supply Chain Strategies, Information and Management, 51(2), pp. 260 – 269.

Lopez, Y. A., Fernandez, M.G., Nanciandi, G.A., Arboleya, A.A., Andres, F. L-H., Cortes, S.G. and Cabanas, M.F. (2018), In Situ Antenna Diagnostics and Characterization System Based on RFID and Remotely Piloted Aircrafts, Sensors and Actuators A, 269, pp. 29–40.

Mall, S. and Mishra, S. (2012). RFID and Supply Chain Management: A Brief Outline. Bu internet sitesinden erişilmiştir: <https://www.researchgate.net/publication/255856999> [Erişim tarihi: 3.05.2026].

Nath, B., Reynolds, F. and Want, R. (2006). RFID Technology and Applications. IEEE Pervasive Computing. 5(1), 22-24.

Nayak, R. (2019). Radio Frequency Identification (RFID) Technology and Application in Fashion and Textile Supply Chain. Boca Raton, FL: CRC Press/Taylor & Francis.

Ngai, E.W.T and Gunasekaran, A. (2009). RFID Adoption: Issues and challenges. International Journal of Enterprise Information Systems, 5(1), pp. 1 - 8.

Peppa, V.P. and Moschuris, S. (2013). RFID Technology in Supply Chain Management: A Review of the Literature and Prospective Adoption to the Greek Market. Global Journal of Engineering Educations. 15(1), pp. 61-68.

Roselli, L. (2014). Green RFID Systems. Cambridge, UK: Cambridge University Press.

Shin, S. and Eksioglu, B. (2014). Effects of RFID Technology on Profitability and Efficiency in Retail Supply Chain. Journal of Applied Business Research, 30(3), pp. 633-646, Smart, A.U.

Ting, S.L., Tsang, A.H.C. & Tse, Y.K. (2013). A Framework for Implementation of RFID systems. International Journal of Engineering Business Management, Bu internet sitesinden erişilmiştir: <http://emeraldinsight.com> [Erişim Tarihi: 03.05. 2026].

Tran, K.P., Nguyen, H.D., Thomassey S., (2019), Anomaly Detection Using Long Short Term Memory Networks and its Application in Supply Chain Management, IFAC Papers Online, 52(13), pp. 2408–2412

Usama, M. and Ramish, A. (2020), Towards a Sustainable Reverse Logistics Framework / Typologies Based on Radio Frequency Identification (RFID), Operations and Supply Chain Management: An International Journal, 13(3), pp. 222 – 232.

Yusof, M.K. and Saman, Y. (2016). The Adoption and Implementation of RFID: A Literature Survey. Library and Information Science Research e-Journal, 26(1), pp. 31-52.

İran’da Muhalif Bir Ses: Molla Nasreddin’in Tebriz Serüveni

Dr. Aynur Asgarova PINAR ¹

¹E-mail: aynuraskerovapinar@gmail.com Eskişehir Osmangazi Üniversitesi İnsan ve Toplum Bilimleri Fakültesi Tarih Bölümü, Eskişehir / Türkiye. ORCID: 0000-0003-2273-5270

Özet

7 Nisan 1906 tarihinde yayın hayatına başlayan ‘Molla Nasreddin’ isimli satirik (hiciv) dergi, 1931 yılına kadar aralıklı olarak 25 sene yayınlanmıştır. 1917 yılının sonlarına kadar Tiflis’te yayınlanan dergi, yaklaşık üç yıllık bir kesintinin ardından bu defa 1921 yılında Tebriz’de yayınlanmaya başlamıştır. Azerbaycan’da 1918-1920 yılları arasında ilan edilen Cumhuriyet’in yerini kısa süre sonra Bolşevik yönetime bırakması, derginin yayıncısı olan Celil Mehmetkuluzade’nin de ülkeyi terk etmesine yol açmıştır. Bu zorunlu ayrılık, Celil Mehmetkuluzade’nin Kafkas coğrafyasında meydana gelen siyasi ve toplumsal olaylardan bir süre uzaklaşmasına sebep olsa da uzun süredir yayınlanamayan derginin okurları ile yeniden buluşmasını da beraberinde getirmiştir. Hiciv geleneğinin en önemli temsilcilerinden olan derginin, Tiflis’teki uzun soluklu yayın hayatı sonrasında Tebriz serüveni başlamıştır. Tebriz’deki yayın hayatı yalnızca sekiz sayı ile sınırlı kalsa da Mehmetkuluzade’nin Güney Azerbaycan hakkındaki yazılarında bölgenin ahvali ile ilgili hayli önemli bilgilere yer verilmiştir. Özellikle halkın içinde bulunduğu sosyo-ekonomik koşullar ve İran’daki hâkim unsurlar ile ulemaya dönük eleştirileri dikkat çekicidir. Bölgede yaşayan insanların içinde bulundukları şartların, yalnızca Mehmetkuluzade tarafından değil aynı zamanda derginin kadrosunda yer alan diğer yazarlar tarafından da kaleme alınması, Molla Nasreddin çevresinin Güney Azerbaycan’a uyum sağlamakta pek zorluk çekmediğini gösterir. Nitekim bütün siyasi baskılara rağmen Tebriz’de yayınlanan sayılarda da derginin hiciv geleneğini sürdürmesi, bu tespitin yerinde olduğuna işaret eder.

Anahtar Kelimeler: Azerbaycan Basını, Celil Mehmetkuluzade, Molla Nasreddin, Tebriz

An Opponent Sound in Iran: The Adventure of Molla Nasreddin in Tabriz

Abstract

Molla Nasreddin begun to be published on 7th April of 1906 as a satirical periodical and its publication went on irregularly till the year of 1931. It has been published in Tbilisi up to 1917 and after the three years of interruption the publication began again in 1921 in Tabriz. After Azerbaijan was invaded by the Soviet Armies in 1920 Celil Mehmetkuluzade who was the publisher of the periodical left his country. He also kept away from the political developments in Caucassia. Molla Nasreddin begun to be published in Tabriz from the beginnings of 1921 but this new era has not continued so long and its publication was ceased after the issue of eight. Although the publication in Tabriz did not continue for a long time the periodical has gone on the same policy like in Tbilisi. That is to say Mehmetkuluzade has written the problems of South Azerbaijan and the people living there.

It means that the authors never hesitate to criticise the local authorities and the ulema (i.e. clergy). In addition to that the challenges confronted in daily life has been always brought by the authors to the columns of the periodical. All these realities have witnessed that Molla Nasreddin simply accord with the conditions in Tabriz. Though the political authorities tried to make pressure on the authors Molla Nasreddin has continued to be a satirical periodical in Tabriz too.

Keywords: Azerbaijan Press, Celil Mehmetkuluzade, Molla Nasreddin, Tabriz

GİRİŞ

Molla Nasreddin, Celil Mehmetkuluzade tarafından belirli aralıklarla 25 sene boyunca yayınlanmış olan satirik (hiciv) bir dergidir. Azerbaycan matbuatının temelini oluşturan ‘Ekinci’ gazetesi, devamında yayınlanan ‘Keşkül’ dergisi ve 20. Yüzyılın başlarında Tiflis’te Azerbaycan Türkçesiyle yayınlanan ‘Şark-ı Rus’ gazetesine kadar devam eden milli düşünce büyük ölçüde ‘Molla Nasreddin’e etki etmiştir. 1905 inkılabı ve 17 Ekim Manifestosu’nun yayınlanması, Kafkasya ve İran coğrafyasında ortaya çıkan modernleşme hareketleri, siyasi ve toplumsal yapılarla birlikte matbuat alemini ve aydın sınıfını da derinden etkilemiştir. Azerbaycan’daki bu dönüşüm sürecinin en dikkat çekici yayın organlarından biri olan ‘Molla Nasreddin’ dergisi, satirik üslubu, halk diliyle kurduğu iletişim ve çarpıcı karikatürleriyle geniş bir coğrafyada tanınmış olmakla birlikte Kafkas halklarının, geniş manada Müslüman Şark’ın ve özellikle Azerbaycan’ın milli uyanışına ve gelişmesine ciddi biçimde etki etmiştir.

Dergi, adını aldığı Molla Nasreddin (Nasrettin Hoca) figürünün geleneğini sürdürerek mizah yoluyla öğretmeyi amaçlamış, halka sevgiyle yaklaşırken halkı ezen kesimlere karşı eleştirel bir tutum sergilemiştir. Açık ve anlaşılır bir halk diliyle yayınlanan dergide, temel düzeyde okuma yazma bilgisine sahip kişilerin dahi kavrayabileceği bir anlatım benimsenmiştir. Bu özellikleri sayesinde dergi, kısa sürede demokratik düşünceye sahip aydınları etrafına toplamayı başarmıştır. Nitekim böyle bir derginin yayınlanması ve başında Celil Mehmetkuluzade gibi önemli bir ismin bulunması, dönemin aydın çevrelerinin dergi etrafında toplanmasına zemin hazırlamıştır. Dergiye Ömer Faik Nemanzade, Mirza Aliekber Sâbir, Abdurrahim Bey Hakverdiyev, Ali Nazmi, Alikulu (Necefov) Gamküsar, Mehmet Said Ordubadi, Mirza Ali Möcüz Şebüsteri v.b. yazar ve aydınlar önemli katkılarda bulunmuştur. Dönemin önemli aydınlarının yazılarıyla yaptıkları katkıların yanı sıra dergi, karikatür geleneğini başlatması açısından da oldukça önemli bir yere sahiptir. Nitekim ilk renkli karikatürler Oskar Şmerling, İozef Rotter, Azim Azimzade, Seyid Ali Behzad gibi dönemin meşhur karikatüristleri tarafından çizilmiştir. Bu anlamda, karikatürün basın hayatına uyarlanması fikri, Celil Mehmetkuluzade ve Molla Nasreddin dergisinin özel bir hizmeti olarak değerlendirilmelidir. Ayrıca karikatür sayesinde derginin okur ve abone sayısı arttığı gibi dağıtıldığı coğrafyanın da bir hayli genişlediği dikkati çeker. (Habibbeyli, 2016: 7)

Karikatürlerin temaları çoğunlukla Celil Mehmetkuluzade tarafından belirleniyordu. Mehmetkuluzade, çizilecek temaların özellikle dönemin önemli siyasi-toplumsal sorunlarıyla ilgili olmasına dikkat ediyordu. Bu sebeple Molla Nasreddin dergisini, yayınlandığı dönemin siyasi hadiselerini yakından takip eden ve devrimci bir içeriğe sahip yayın organı olarak tarif etmek yanlış sayılmayacaktır. Dergiyi çıkaran ve Molla Nasreddinciler olarak adlandırılan yazarlar, mensubu oldukları ve hitap ettikleri halkla birlikte hayatın bütün acımasızlıklarına hem tanıklık etmiş hem de deneyimlemişlerdi. (Nemanzade, 1983: 143-144) Bu aydınlar grubunun tartışacakları başlıkları belirleyen ve yol gösteren Celil Mehmetkuluzade ve onun Molla Nasreddin dergisi olmuştur. Milli demokratik matbuatın öncüsü konumunda bulunan Molla Nasreddin dergisi, aynı zamanda Azerbaycan'daki batı tarzı eğitimi yerleştirmeyi amaçlayan maarifçilik hareketinin de doğal sonucuydu. Ancak Mehmetkuluzade, batılı eğitim tarzı üzerinden oluşan bu birikimi Azerbaycan'ın yüzlerce yıldır devam eden kültürel birikimiyle harmanlayarak ulusal reflekslere sahip yeni nesil bir yayıncılık faaliyeti meydana getirmiştir. (Habibbeyli, 2009: 6)

Mehmetkuluzade, dönemin siyasi baskı ortamı nedeniyle fikirlerini doğrudan ve açık bir dille ifade etmekten bilinçli olarak kaçınmaktaydı zira dergi, Çarlık hükümeti tarafından her an sansüre uğrayabilir veya tamamen kapatılabilirdi. Bu baskıcı koşullar, onu hem içerik hem de ifade biçimi bakımından yeni bir yol arayışına sevk etti. Dolaylı anlatımı, eleştirel mizahı ve sembolik dili temel alan satirik üslup, bu zorunluluğun ürünü olarak ortaya çıktı. Satirik üslup aynı zamanda, dönemin siyasal denetim mekanizmalarını aşmaya yönelik stratejik bir araç niteliği taşımaktaydı. (Mirahmedov, 1958: 110) Nitekim o döneme kadar Azerbaycan'da ve Rusya İmparatorluğu sınırları dahilinde yaşayan Müslüman milletlerin matbuatında, hatta daha geniş anlamda Ortadoğu ve bütün İslâm dünyasında bu denli sistematik ve güçlü bir satirik matbuat geleneğine rastlanmamaktaydı. Bu bağlamda 'Molla Nasreddin' dergisi, yalnızca bir yayın organı değil aynı zamanda toplumsal eleştirinin yeni bir şekli olarak ortaya çıktı ve kısa sürede geniş bir etki alanı kazandı. Celil Mehmetkuluzade'nin ifadesiyle, Molla Nasreddin'i tabiatın kendisi doğurdu, zamanın kendisi yarattı. (Şerif, 1946: 14-16) Mehmetkuluzade'nin bu cümlesi, derginin tarihsel koşulların zorunlu bir ürünü olduğunu vurgulayan çarpıcı bir değerlendirme niteliğindedir.

Mehmetkuluzade'nin ifadesiyle zamanın ruhunun bir yansıması olan Molla Nasreddin, 1905 Rus İhtilali sonrasında 7 Nisan 1906 tarihinde Kafkasya'nın önemli merkezlerinden Tiflis'te yayın hayatına başlamıştır. Celil Mehmetkuluzade, 1903 yılı itibarıyla Tiflis'e taşınmıştı. Tüm Kafkasya'nın Azerbaycan Türkçesiyle yayınlanan yegâne gazetesi olan Şark-ı Rus'ta yazılar yazan Mehmetkuluzade, Tiflis yayın dünyası tarafından da tanınmaktaydı. Gazetenin son sayılarında geçici muharrir olarak Celil Mehmetkuluzade'nin ismi yer almış ve 1905 yılının başlarında Şark-ı Rus kapatılmıştır. Burada elde ettiği tecrübe kısa süre sonra çıkaracağı Molla Nasreddin dergisinde kendisine yol gösterecekti. (Mehmetkuluzade, 1967: 264) Ayrıca Tiflis'te bulunan Gayret Matbaası'nda ileride Molla Nasreddin dergisinde en önemli destekçisi olacak olan Ömer Faik Numanzade ile birlikte çalışmış, derginin redaksiyon ve mali sorunlarını birlikte çözmüşlerdi. Bunların yanı sıra Tiflis'in, Kafkasya'nın merkezi olarak kabul edildiği dönemlerde, Azerbaycan'ın tanınmış maarifçi aydınlarının burada bulunması, Azerbaycan Türklerinin Kafkas coğrafyasındaki rolünü kuvvetlendirmiştir. (Babayeva, 2020: 9)

Kafkasya'da yaşayan Türk ve Müslüman unsur arasında hayli geniş sayılabilecek bir okur kitlesine kavuşan derginin etkisi, zamanla bölgenin sınırlarını aşmıştır. Derginin sahip olduğu bu etki, özellikle

siyasi otoritelerin baskısını da beraberinde getirmiştir. Mesela 1906-1912 yılları arasında, İran ve Osmanlı Devleti'ndeki siyasî durum, kadın özgürlüğü, dil ve alfabe meselesi gibi temalarda pek çok yazı yayınlandığı için dergi, Tiflis Matbuat İşleri Komitesi tarafından matbuat özgürlüğü prensiplerinin ihlal edildiği gerekçesiyle takibe maruz kalmıştır. Özellikle, derginin İran ve Osmanlı siyasi hayatına dair yayınlamış olduğu yazı ve karikatürler, kısa aralıklarla yayının durdurulmasına sebep olmuştur. 1911 yılında İtalya'nın Trablusgarp'a saldırmasıyla başlayan Trablusgarp Savaşı ve 1912 yılında başlayan Balkan Savaşları'nın dergide geniş yankı bulması, yayının yeniden durdurulmasına sebep olmuş ve yaklaşık dokuz ay kadar ara verilmiştir. 1913 yılında toplam 29 sayı yayınlanmıştır. 20 Şubat 1913 tarihinde yayınlanan 6. Sayıdan itibaren Celil Mehmetkuluzade dergiyi yakın arkadaşı Alikulu Necefov'la birlikte yayınlamaya başlamıştır. Bu durum, derginin 1914 yılında yayınlanan son sayısına kadar devam etmiştir. 1914 yılında dergi aralıklı olarak yayınlanmış ve Birinci Dünya Savaşı'nın başlamasıyla yayını tekrar durdurulmuştur. Böylece derginin savaşı ilgili haberleri sütunlarına taşıma fırsatı elinden alınmıştır. (Şerif, 1986: 357)

18 Ekim 1914 tarihinde yayınlanan 25. Sayının ardından dergi, iki yıldan daha uzun bir süre boyunca yayın hayatından zorunlu olarak uzak kalmıştır. Bolşeviklerin iktidara gelmesiyle 1917 yılından sonra yayın hayatına dönse de bu dönem pek uzun sürmemiştir. Daha sonra dergi, 1921 yılında kısa bir süre İran'ın Tebriz şehrinde yayınlanmıştır. Bu yönüyle Molla Nasreddin, Azerbaycan'ın hem kuzeyinde hem de güneyinde neşredilen ilk matbuat organı olma özelliğine de sahiptir. (Habibbeyli 1994: 12) Tebriz'de yayınlanan sayılar, derginin Tiflis'te başlayan macerasının üslup ve muhteva açısından değişmeden devam ettiğini göstermesi açısından hayli ilginçtir. Tebriz'de yayınlanan sayılarda da dergi, iktidar sahiplerine dönük eleştirel dili muhafaza ederken bu defa İran'ın kuzeyi veya Azerbaycan'ın güneyindeki politik-toplumsal sorunları dile getirmekten çekinmeyecektir. Tebriz'de yayınlanan sayılar, iki ayrı devletin sınırları içinde yaşamak zorunda kalsa da Azerbaycan Türklerinin ortak sıkıntılara sahip olduğunu gösterir.

YÖNTEM

Çalışma iki müstakil başlık halinde kaleme alınmıştır. Birinci bölümde, Molla Nasreddin Dergisi'nin, Tiflis'te başlayan ilk yayın serüveninden itibaren Güney Azerbaycan'daki sosyal, siyasal ve ekonomik sorunları sütunlarına taşıması anlatılmıştır. Bölgede yaşayan halkın karşılaştığı problemler ve bölgenin her açıdan geri kalmış hali derginin sayfalarına yansımış ve bu durum üzerinden İran yönetimi en sert şekilde eleştirilmiştir. Bölge halkının bu sorunlardan kurtulmak için sürdürdüğü özgürlük mücadelesi ise yakından takip edilmiştir. Çalışmanın ikinci bölümünde ise derginin Tebriz'de yayınlanan sayıları ele alınmıştır. Bu defa Güney Azerbaycan'ın en önemli şehri olan Tebriz'deki sorunlar derginin satırlarına bizzat Tebriz'den yansıtılmıştır. Derginin ana kaynak grubunu Molla Nasreddin Dergisi'nin ilgili nüshaları oluşturmuştur. Ayrıca konuyla ilgili literatürden de dikkatli ve titiz biçimde yararlanılmıştır.

MOLLA NASREDDİN DERGİSİ'NDE İRAN HAYATININ YANSITILMASI

Molla Nasreddin dergisi neşre başladığı ilk günden itibaren Türk ve Müslüman halkların hayatında meydana gelen sosyo-kültürel ve politik konuları önemsemiş ve sütunlarına taşımıştır. Dergide Kuzey Azerbaycan'ın meseleleri kadar, Güney Azerbaycan konusu da önemli bir yer bulmuştur. 20. Yüzyılın ilk on yılında meydana gelen hadiseler, güneydeki soydaşların hayatı, mücadelesi derginin esas temaları

arasında yer almıştır. Halkın yaşamındaki zorluklar, büyük toprak sahiplerinin acımasız tavrı daha derginin ilk sayılarından itibaren dile getirilmiştir. *Tebriz pazarında satılan ekmeğin bir kısmı un, üç kısmı ise topraktır.* (Molla Nasreddin, 1906, S. 10: 6) Dergi, kıtlık sebebiyle Tebriz’de dul kadınların, yetim ve fakirlerin toprak yediğini aynı zamanda İran’ın memleketinin ahlaksız hakimler, merhametsiz vezir ve din adamlarının elinde olduğunu, *Tahrân’da hürriyet mücahitlerinin kanlarının sokaklara yayıldığını* büyük başlıklarla vurgulamıştır. (Molla Nasreddin, 1906, S. 26: 2) Bu bakımdan Molla Nasreddin, sadece Kafkas Türklerinin ya da Kuzey Azerbaycan halkının değil aynı zamanda Güney Azerbaycan Türklerinin de matbuat organı olmak gibi bir sorumluluğu onurla taşımıştır. (Habibbeyli, 2009: 305) Konuya ilişkin Celil Mehmetkuluzade, *Müşterilerin yarıdan çoğu İran ahalisidir. Horasan’dan itibaren Tahrân, İsfahan, Tebriz’e kadar söz konusu şehirlere, hatta köylere on beş binden ziyade mecmuamız ulaşıyor. Bunun on üç bin altı yüz doksan kadarı yıllık abonelerimizdir. Geriye kalanı ise tek tek satılmaktadır demektedir.* (Molla Nasreddin, 1906, S. 5: 2) Öyle ki, Molla Nasreddin’in yayınlandığı tarihlerde Tebriz’de karikatürlü bir hiciv gazetesi olan ‘Azerbaycan’ çıkmaktaydı. Mizahi rekabet konusunda Molla Nasreddin’le yarışmaya çalışan ve dönemin aydınları tarafından ondan sonraki en iyi yayın organı olarak değerlendirilen gazetede, Molla Nasreddin’e duyulan hayranlık açıkça hissedilmekteydi. Bu iki yayın organı sayfalarında yayınlanan yazılarla birbirlerine adeta cevap vermiş ve aynı çizgide olduklarını okurlarına hissettirmişlerdir. Molla Nasreddin’de yayınlanan şiirlere cevaben Azerbaycan gazetesinde yayınlanan şiirler gazetenin tanınmasında çok etkili olmuştur. (Kesrevi, 2003, c. I: 319-322) Alikulu Seferov tarafından çıkarılan Azerbaycan gazetesi, şekil ve içeriği bakımından Molla Nasreddin’e çok benzemektedir. Nitekim gazete bu benzerlik sebebiyle Güney Azerbaycan’ın Molla Nasreddin’i olarak adlandırılmıştır. (Babayeva, 2021, S. 2: 55) Azerbaycan gazetesi 21 sayı yayımlandıktan sonra kapatılmıştır. Gazetenin yayınlandığı Ümid Matbaası, yıllar sonra Molla Nasreddin’in Tebriz serüveni başladığında üçüncü sayıdan itibaren derginin yayınlanmasına da aracılık etmiştir. (Hasanzade 1991: 29)

Güney Azerbaycan’daki hadiseleri, Celil Mehmetkuluzade ve Molla Nasreddinciler olarak adlandırılan grubun temsilcileri yakından izlemekteydi. Ezilen sınıflara yakınlık, onları ezenlere karşı öfke hatta nefret besleyen dergi, Şah despotizmini en ağır dille eleştirmektedir. (Mehmedov, 1989: 184) Dergi yayınlandığı ilk günden itibaren Güney Azerbaycan’ın bağımsızlığı konusunu gündemine taşımıştı. Şah rejiminin değiştirilmesini arzulayan ve bunu sayfalarında sürekli tebliğ eden Mehmetkuluzade ve arkadaşları, ülkenin bağımsızlığı için büyük ve ciddi ıslahatlar yapılması gerektiğini belirtmekteydi. Bu Molla Nasreddinci aydınlardan biri derginin bir dönem ikinci muharrirliğini yapan Alikulu (Necefov) Gamküsar olmuştur. Özellikle 1907-1909 yılları arasında İran’da meydana gelen olayları yakından izleyen şair, Güney Azerbaycan konusunu gündeme taşımıştır. Güney’deki kardeşlerin bağımsızlık uğrunda çabaları, meşrutiyet hareketleri, istibdada ve Şah rejimine karşı verilen mücadele onun yazılarının esas temalarını oluşturmaktaydı. Mesela Gamküsar, Tebriz inkılabının şah orduları tarafından bastırılmasının, halkın bu mücadeleye gereken desteği vermemesinden kaynaklandığını ifade etmektedir. (Babayeva, 2023, S. 1: 186)

Tebriz’deki hareket başarısız olsa da İran’daki meşrutiyet dalgası kolayca bastırılamadı. Nitekim bu dalga öylesine etkiliydi ki 1909 yılının Ekim ayında Muhammed Ali Şah ülkesinden kaçarak Rusya’ya sığınmak zorunda kaldı. 1911 yılında Hazar denizini gizlice geçip İran sınırlarına girerek kendine bağlı kuvvetlerle Tahrân’a yürümeye kalksa da değişim taraftarlarının gücüne dayanamadı ve ülkesini tekrar terk etmek mecburiyetinde kaldı. (Zamanov, 1979: 125) Molla Nasreddin’in, Güney Azerbaycan’daki

bütün meseleleri yakından takip ettiği, bu sarsıcı olayların derginin sütunlarına Gamküsar'ın bir şiiriyle yansıtılmasından anlaşılmaktadır. (Molla Nasreddin, 1911, S. 33: 2) Aslında İran'daki inkılap hareketleri, Molla Nasreddin'in yayınlanmasından daha önce başlamıştı. Siyasî içerikli protestolar ve işçilerin düzenlediği grevler hem Güney Azerbaycan'ın hem de İran'ın pek çok şehrine yayılmıştı. Bu gösterilere katılanların ortak talebi, ilan edilen Meşrutiyetin düzgün bir şekilde çalışması ve parlamentonun açılmasıydı. İran'daki durum ve halkın talepleri, derginin yayın hayatına başladığı ilk günden itibaren ana konular arasında yer almıştır. Mesela derginin ilk sayısında, İran şahlarının ülkede yaşayanların hayatıyla ilgilenmediği, sürekli dış ülkelere seyahat ettiği, halka verilecek hürriyetin boş bir yalandan ibaret olduğu, düzenli ordunun içler acısı hali, sanayinin kötü durumu gözler önüne serilmekteydi. (Molla Nasreddin, 1906, S. 1: 3)

Celil Mehmetkuluzade, dergisi yayınlandıktan sonra büyük meselelerinden birinin *Vatanımızın İran tarafında dağ gibi duran istibdad.... Şahların keyfe mâ-yeşâsı idi* demektedir. (Mehmetkuluzade, 1951: 433) Güney Azerbaycan'ın önemli liderlerinden Mir Cafer Pişeveri, Molla Nasreddin'in İran'ın Meşrutiyet inkılabına olumlu tesirini vurgulayarak Celil Mehmetkuluzade'nin kalbinin daima onlarla birlikte attığını dile getirmiştir. (Caferov, 1966: 32-33) Ayrıca, İran Anayasası'yla ilgili olarak Celil Mehmetkuluzade, *Zulmet çok derindir...Şark'ın kara bulutları bizim Müslümanların da medeniyet ve maarifinin önünü kesmektedir...Kanun-i Esasi ilan edildiğinde İran'ın düzeleceğini düşündüğümünden çok sevinmiştim. Sonunda İranlıların rahat nefes alabileceklerini ümit etmekteydim. Ama şimdi onun ne olduğunu anladım. İşe yaramayan bir parlamento...* (Molla Nasreddin, 1922, S. 3: 2; Mehmetkuluzade, 1961: 727) diyerek bu konudaki ümitlerinin yok olduğunu dile getirmektedir.

Mehmetkuluzade'nin, meşrutiyet ilan edilse de İran'daki siyasî manzaranın değişmeyeceğine dönük tespiti ülkedeki politik gerçeklikle yakından ilgilidir. Zira Şah Muzafferüddin'in yerine tahta geçen veliaht Muhammed Ali Mirza da selefinin yaptıklarını adeta taklit etmektedir. Halkın içinde bulunduğu içler acısı hal ve istibdad değişmeden devam ettiği gibi mollaların ve hukuk adamlarının baskısı da aynıyla sürmektedir. Tebriz, meşrutiyet ve bağımsızlığın en büyük düşmanın ikamet ettiği bir şehir olduğu için adeta istibdadın kalesi haline gelmiştir. (Kesrevi 2003: 178) Bütün bu yaşananları yakından izleyen Mehmetkuluzade, Muhammed Ali Şah'ın *Tebriz ahalisine ekmek yerine İran'ın dağları ve taşlarını yedirdiğinden* ve şahın meşrutiyet karşıtı uygulamalarından bahsederek *yazık oldu sana ey güzel vatanım* diyecektir. (Molla Nasreddin, 1907, S. 5: 2-3) Şahın, özellikle şeriat yanlısı ulema ile birlikte hareket ederek yenilikçi din adamlarının meşrutiyet yanlısı sözlerini umursamadığı ve hatta meşrutiyetçilerin kâfir olduğunu iddia ettiği derginin sayfalarına yansıyan haberler arasındadır. Dergiye göre İran'daki bu karışıklığın ve çaresizliğin tek sorumlusu şeriat yanlısı bu ulema sınıfından başkası değildir. (Molla Nasreddin, 1908, S. 52: 5-6) İran ve Muhammed Ali Şah'a yönelik haberlere derginin hemen her sayısında yer verildiği söylenebilir. Şubat 1908 tarihinde Tahran'da Muhammed Ali Şah'a karşı düzenlenen başarısız suikast girişiminin ardından Molla Nasreddin, *vücûd-ı muhteremin teşrifinin tehir edildiğini* belirterek Şah'a ve idaresine duyduğu nefreti açıkça ilan etmekten çekinmemiştir. (Molla Nasreddin, 1908, S. 7: 2) Bir diğer sayıda ise alaycı bir üslupla artık istibdadın işe yaramadığı, buna bir son verilmesi gerektiği hususu Şah'ın baş haremi ile aralarında geçen sohbet aracılığıyla vurgulanmıştır. (Molla Nasreddin, 1908, S. 9: 3)

İran meşrutiyeti konusu uzun süre derginin sayfalarında yer almış, meşrutiyet ve inkılap karşıtları sert biçimde eleştirilmiştir. Dergide yayınlanan bir şiirde, meşrutiyet karşıtları İranlıların deyişiyle şahseven

ve köhneperest insanlardır. Aynı şiirde meşrutiyetin İran’da henüz yerleşmediği vurgulanarak şahın ve en büyük yardımcısı Hacı Seraya Han Şapşal’ın meşrutiyeti boğmak için ellerinden geleni yaptıkları belirtilir. (Molla Nasreddin, 1908, S. 10: 3-6) Molla Nasreddin dergisi, Tebriz’in önemli devlet adamlarının ve ulemalarının meşrutiyetin meydana gelmesindeki hizmetlerinden bahsederken gerçekte önemli makamlarda bulunan idarecilerin meşrutiyeti zerre kadar önemsemediğini, *hürriyet sözcüğünün duyulduğu andan itibaren Tebriz’deki tüm matbaaların kapatıldığını* söylemektedir. (Molla Nasreddin, 1906, S. 32: 7; S. 33: 3)

İran’da şah hükümeti tarafından meşrutiyet taraftarlarını ortadan kaldırmak için 23 Haziran 1908 tarihinde meclis binası ve Sipehsalar mescidi gibi yerlerde toplanan inkılapçıların üzerine askeri birlikler gönderildi. Bahsi geçen binalar top ateşine tutuldu ve yağmalandı. 300 civarında meşrutiyet taraftarı öldürüldü; meclis temsilcilerinden ve anayasa taraftarlarından pek çoğu tutuklandı ya da sürgün edildi. (Cenubî Azerbaycan Tarihini Oçerki, 1985: 148-149) Meclis kısa sürede düştü. Meşrutiyet hareketi yenilgiye uğramış görünüyordu. Bu sırada Şah, bir daha meşrutiyete dönülmeyeceğini ilan etti. (Sohrabi, 2011: 419) Bu olay, İran Meşrutiyet tarihinin en büyük kırılmalarından biridir.

İnkılap karşıtlarının İran’da harekete geçtiği günlerde Molla Nasreddin dergisi de yaşananları sayfalarına taşımaktan çekinmedi. *Muhammed Ali Şah, Meclis-i Mebusan’ı top ateşine tuttu, İran’da Sipehsalar mescidini de perişan eyledi, hürriyet isteyenleri astırdı ve sonunda arzusuna ulaştı* demektedir. (Molla Nasreddin, 1908, S. 34: 6) bir başka sayıda ise Muhammed Ali Şah, Roma İmparatoru Neron ile mukayese edilerek onun İran’a yaptığı zulmün Neron’un Roma’ya yaptıklarından daha fazla ve zalimce olduğu iddia ediliyordu. (Molla Nasreddin, 1908, S. 31: 6) Tahran’da yapılanlar, Millet Meclisi’nin harabeye dönmüş hali ve özgürlük yanlılarının uğradığı zulüm, dergide yayınlanan bir şiirin dizelerine de yansıyor ve *tutup söz yok ki imdi nâm-ı nikim külli dünyayı / niçin kim eyledim bir zerb ile vîrâne İran’ı* şeklindeki ifadelerle şaha duyulan öfke dile getiriliyordu. (Molla Nasreddin, 1908, S. 31: 3) Ancak basına yansıyan bu öfkeye rağmen Muhammed Ali Şah’ın özgürlük taleplerini kuvvet yoluyla bastırmaya dönük girişimlerinde herhangi bir değişiklik olmaz. 1909 yılı Ocak ayında İran’ın her tarafından topladığı silahlı güçlerle Tebriz üzerine yürüyerek şehri kuşatır. Aynı zamanda Rus orduları da şehre girerek şahın güçlerine destek verir ve Tebriz isyanı bastırılır. Her ne kadar geçici olarak isyan bastırılrsa da Tebriz’deki özgürlük çılgılığı, Güney Azerbaycan’da aynı fikir uğruna verilen mücadelenin yeniden canlanmasına yol açmıştır. Nitekim Tebrizli özgürlük yanlıları, Tahran’a yürüyecek ve Muhammed Ali Şah’ın devrilmesini sağlayacaklardır. (Azerbaycan Tarihi, 1994, c. I: 633-634)

16 Temmuz 1909 tarihinde tahttan uzaklaştırılmış olan Muhammed Ali Şah 1911 yılında tahtı yeniden ele geçirmek için harekete geçer. Rus çarı da desteğini açıklar. Muhammed Ali İran’a döndüğünde geniş halk kitlelerinin tepkisiyle karşılaşır. *‘Aldı Yeni Bir Renk Gene Kışver-i İran, Döndü Geri Devran’* sözleriyle başlayan şiirde Muhammed Ali Şah’ın ülkeye geri dönüşü ifade edilmektedir. Şahın dönüşü, son derece alaycı bir üslupla derginin sayfalarına yansıtılır. Anasından şah olarak doğduğu, kendisi olmazsa İran’da din ve iman kalmayacağı gibi sözlerle adeta alay edilirken meşrutiyet taraftarlarının şahın dönüşünden ötürü çok endişeye kapıldıkları da ironik biçimde satırlara aktarılır. (Molla Nasreddin, 1911, S. 26: 2-3) Aynı sayıda yayınlanan bir diğer yazıda ise *Muhammed Ali Şah kemal-i iftihar ile İran’a varid oldu. İnşallah bundan sonra işler çok güzel olur asudelik tekrar onarılır. Bu durumda ne*

kadar insan ölse de geriye yarısı kalsa berekettir sözleriyle Şah'ın ülkeye geri dönüşüyle İran'ı bekleyen zor günlerin kapıda olduğu vurgulanmaktadır. (Molla Nasreddin, 1911, S. 26: 7)

1911 yılının sonlarına doğru Molla Nasreddin dergisinde yayınlanan ve ünlü ressam Oskar Şmerling tarafından çizilen bir karikatürde yeni şah Ahmet'in görüntüsü tasvir ediliyor, altına yeni Şah'ın dedelerinin Muzaferüddin ve Nasreddin Şah, babasının Muhammed Ali Şah olduğu, Kaçar soyundan geldiği ifade ediliyordu. *Sen hıfz eyle şahlar arasında bu şehzadeyi* diyerek, hemen arka sayfasında ise bu durum sonrasında Muhammed Ali Şah'ın ülkeyi terk ettiği ve İran'da hiçbir ümidinin kalmadığı bir şiir aracılığıyla dile getiriliyordu. (Molla Nasreddin, 1911, S. 33: 2) Derginin İran ve İran'daki meşrutiyete olan ilgisi, neredeyse yayın hayatı boyunca hiç eksilmeden devam etmiştir. Meşrutiyetin istenilen sonucu vermediği ve artık meşruti idarenin sonuna gelindiği acıklı sözcüklerle ifade edilir. (Molla Nasreddin, 1911, S. 6: 6) Özellikle Tebriz'de, halkın büyük ümit ve fedakarlıklarla beklediği meşrutiyet idaresinin bir türlü kurulamadığı vurgulanırken parlamento düzgün çalışmadığı gibi şahın da yine Avrupa'ya kaçtığından bahsedilir. (Molla Nasreddin, 1911, S. 43: 3; Molla Nasreddin, 1913, S. 8: 3)

İran siyasetine duyulan bu ilginin ötesinde Molla Nasreddin dergisinin aslında Güney Azerbaycan'ın tamamıyla ilgilendiğini söylemek yanlış sayılmaz. Bölgedeki ve tüm İran'daki siyasî gelişmeler kadar halkın gündelik yaşamında karşılaştığı zorluklar ve sıkıntılar da derginin objektifinden kaçmaz. Ancak zorluklar içindeki bu gündelik hayat da yine ülkenin içinde bulunduğu politik atmosferin ya da yapının doğal sonucu olarak görülür. Mesela halk acınacak halde ve özellikle işçiler adeta sefalet içinde yaşamaktadır. Zorluk içindeki bu hayatın asıl sebebi İran'da hürriyetin olmayışdır. Bu baskıcı ortamı yaratan ise *cellat ve hırsız* olarak nitelenen başta devlet ricali ve ulema olmak üzere bütün iktidar sahipleridir. (Molla Nasreddin, 1906, S.7: 7; Molla Nasreddin, 1906, S. 12: 6-7; Molla Nasreddin, 1906, S. 27: 2-3) İran'ın içinde bulunduğu sefalet ile liyakatsiz devlet adamları arasında kurulan simbiyotik ilişki, herhangi bir gizleme ihtiyacı duyulmadan derginin sayfalarına olduğu gibi aktarılır. Mesela Tebriz'deki yoksulluk, baskı ve zulüm, bölgeyi idare eden Mir Haşim'in kötü idaresinden kaynaklanırken Erdebil'in acınacak halinin sorumlusu Reşidü'l-Mülk, Tahran'daki sefaletin müellifi ise Şeyh Sadık'tan başkası değildir. Nihayet dergi, bu kötü idarenin altında yatan asıl sebebi ise *İran, İranlıların değil* diyerek veciz biçimde ifade edecektir. (Molla Nasreddin, 1908, S. 9: 6-7) Böylece Molla Nasreddin dergisi etrafında toplanan aydınlar, ideal ve en doğru yönetim biçiminin, meşruiyetini halktan alan idare olduğunu ilan etmiş olurlar.

Celil Mehmetkuluzade ve Molla Nasreddin Dergisi, siyasetin yanı sıra İran'daki ve özellikle Güney Azerbaycan'daki eğitim sistemini de yakından takip etmişlerdir. Gerek Mehmetkuluzade gerek dergi çevresinin eğitim konusundaki eleştirilerinin odağında laik olmayan yönetime duyulan öfke bulunmaktadır. Özellikle medreselerde kötü fiziki ortamlarda verilen dersler temel eleştiri konularının başında gelir. Müderrislerin öğrencileri şahsi işleri için kullanmaları ve keyfi cezalar vermesi ise şikâyet edilen başka bir konudur. (Molla Nasreddin, 1907, S. 1: 2) Okullarda verilen eğitim o kadar içeriksiz ve zordur ki öğrenciler, temel okuma-yazma becerisini sekiz yılda kazanabilmekteydi. (Molla Nasreddin, 1907, S. 4: 2) Mehmetkuluzade'ye göre ulemanın hâkimiyeti altındaki bu eğitim sistemi artık çağdışı kalmıştı. Bilimin ve maarifin yayılmasındaki en önemli engellerden biri de ulemanın eğitim modeliydi ve halk, ulemaya karşı birleşmek zorundaydı. (Mehmetkuluzade, c. II, 2004: 128) Eğitimdeki geriliğin bir diğer sebebi olarak ise alfabe gösteriliyordu. Dergi yazarlarına göre Arap diline uygun olan bu alfabe,

eğitimin gelişmesinin önündeki en önemli engeller arasında yer alıyordu ve okuma-yazmanın öğrenilmesini zorlaştıran bu alfabe ulema tarafından özellikle destekleniyordu. (Molla Nasreddin, 1906, S. 5: 3) Dergi ayrıca ülkenin dışında eğitim alıp İran'a dönenlerin yeterince desteklenmemesini de eleştiriyor ve dini içerikli eğitimin cehalet aşıladığından bahsediyordu. (Molla Nasreddin, 1906, S.35: 2) Okurlarına Mirza Melkum Han ve Zeynel Abidin Meragiyi'nin yazdıklarını okumalarını tavsiye eden dergi, ülkelerinin geleceği üzerine düşüncelerini de özellikle hatırlatır. (Molla Nasreddin, 1907, S. 3: 2-3)

Dergi okurlarını ülkelerinin geleceği üzerine düşünceleri konusunda uyarırken aslında uluslararası siyasetteki gelişmeleri anlatmaya çalışmaktadır. Buna göre dergi, Ağustos 1907'de İngiltere ile Rusya'nın bir anlaşmaya vararak İran'ı aralarında nüfuz bölgelerine ayırdığını belirtmekte ve İran'ın başta bu iki devlet olmak üzere diğer büyük devletler tarafından paylaşıldığı karikatürlerle tasvir edilmektedir. (Molla Nasreddin, 1907, S.42: 1) Büyük devletler çıkarları uğruna aralarındaki uyuşmazlıkları bir kenara bırakırken hem Müslümanlar hem de Kuzey ve Güney Azerbaycan'da yaşayanlar birbirinden ayrılmaktadır. Özellikle Güney Azerbaycan'da yaşayanların Kafkasya'yı ilgilendiren bir sorun olduğunda İranlı, İran'ı ilgilendiren bir sorun olduğunda ise Kafkasyalı olduklarını söylemesinin doğru olmadığı açıkça belirtilir. (Molla Nasreddin, 1907, S.9: 3) Bu iki yüzlü tutum, ayrışmayı derinleştirirken İran topraklarına doğru genişleme planları yapan Rusya'nın işini de kolaylaştırmaktadır. Bu ayrışmanın sebebi ise diğer tüm sorunlarda olduğu gibi adaletsiz ve baskıcı yönetimdir. Bir başka ifade ile emperyalist yayılmanın ortağı veya işbirlikçisi konumundaki bu idarenin ortadan kaldırılması için Güney Azerbaycan Türklerinin mücadelesine Kuzeydeki kardeşleri destek olmak zorundadır. Zira *bugün Kerbela Meydanı, Azerbaycan vatanperverlik meydanıdır*. (Molla Nasreddin, 1909, S. 2: 4-5)

İran'daki özgürlük mücadelesini yakından takip eden Molla Nasreddin Dergisi, büyük devletlerin emperyalist hayalleri de dahil olmak üzere bütün sorunların kaynağında İran'ın, şahtan başlayarak bütün dini ve bürokratik mekanizmaya yayılan çürümüşlüğüne teşhis eder. Bu çürümeden kurtulmanın yolu ise temelinde halkın özgürlüğünün olduğu bir idare kurmaktan geçmektedir. Bu devrimci tutumu ve yayın politikası sebebiyle İran'daki müesses nizam yanlıları tarafından derginin ülkeye girişi yasaklanmıştır. (Paşayev, 2010: 56) Hatta Tebriz'de, Molla Nasreddin çizgisinde yayın yapan Debistan isimli derginin de kapatılması için ulema ve tüccarlar yönetime baskı yapmıştır. (Molla Nasreddin, 1906, S. 19: 3-6) Derginin sahibi ve baş yazarı Mehmetkuluzade, kâfir olarak nitelenmekte ve İran'da yaşanan pek çok olumsuz olayın sorumlusu olduğu iddia edilmektedir. (Molla Nasreddin, 1906, S. 34: 7) Veliaht Muhammed Ali Mirza, derginin kesinlikle ülkeye sokulmaması gerektiğini hatta okuduktan sonra İran sınırında yakmaya karar verdiğini söylerken ülkeye girişinin yasaklandığını da ilan etmektedir. (Molla Nasreddin, 1906, S.36: 3) Hatta İran'ın İstanbul büyükelçisi Mirza Rıza Han Erfeüd-Devle'nin Osmanlı hükümeti nezdinde gerekli girişimlerde bulunarak derginin İstanbul'a girişinin yasaklanmasını sağladığı belirtilir. Üstelik dergiye abone olacak kişilerin hükümete ihbar edilmesi halinde ihbarcıya 100 lira ödül verileceği de ayrıca vurgulanır. (Molla Nasreddin, 1907, S.6: 6)

Yayın hayatına başladığı günden itibaren Molla Nasreddin dergisi İran veya daha doğru deyişle Güney Azerbaycan konusunda hayli yüksek bir dikkat ve ilgi sergilemiştir. Muhalif ve özgürlükçü üslubundan dolayı İranlı otoriteler dergiyi yakından izlemiş ve yukarıda ifade edildiği gibi derginin ülkeye girişini de yasaklamaya çalışmıştır. Ancak bu yasaklama girişimlerine rağmen Molla Nasreddin ve Celil

Mehmetkuluzade'nin, İran'a yönelik ilgisi dergi yayın hayatına devam ettiği müddetçe eksilmeden sürmüştür. Mesela Sovyet döneminde yayınlanan sayılardan birinde Ekim ayının önemine atıfta bulunarak sırasıyla Bolşeviklerin iktidara gelmesi, Türkiye Cumhuriyeti'nin kurulması ve İran'da Kaçar hanedanının devrilmesinin Ekim ayında olduğu hatırlatılmıştır. (Molla Nasreddin, 1925, S. 45: 2) Ancak Kaçar hanedanı devrilse de bu defa Rıza Pehlevi'nin yeni Şah olarak tahta oturması, İran'da bir cumhuriyet rejiminin kurulmasını ümit eden dergi çevresinde büyük bir hayal kırıklığına yol açmış ve Güney Azerbaycan Türklerinin harekete geçmemesinden ötürü derin bir üzüntü duyulduğu belirtilmiştir. (Molla Nasreddin, 1925, S. 51: 2) Bir başka ifade ile 1906 yılında yayın hayatına başlayan dergi, ilk günden itibaren Güney Azerbaycan'daki özgürlük mücadelesini temel meselelerden biri olarak sütunlarına taşımış ve bu uğurda mücadele eden isimleri de kamuoyuna tanıtmıştır. (Ferhadov, 2020, c. 68, S. 2: 82)

MOLLA NASREDDİN'DE TEBRİZ'DEN İZLENİMLER

Daha 20. Yüzyılın başlarında, Settarhan'ın, İran Şahını devirerek Meşrutiyet hareketini hâkim kıldığı dönemde verilen mücadele, Molla Nasreddin sayfalarında yerini bulmuştu. Derginin ilk beş yılına şiirleriyle damga vurmuş büyük hiciv şairi Mirza Aliekber Sâbir bir şiirle Settar Han hareketine gösterilen ilgiyi ifade etmiştir. (Sâbir, 1962: 82) Sâbir, bu şiirinde *...Türkler Settar Han ile ahd ü peymân eylediler / Zulm-ü istibdada karşı nefret ilan ettiler* diyerek Settar Han ve özgürlük mücadelesine verilen desteği açıkça dile getirmişti. (Molla Nasreddin, 1908, S. 42: 6) Ancak Settar Han, özgürlük mücadelesinde halktan beklediği yeterli desteği görememiş ve Rusya'nın müdahalesiyle başlattığı hareket bastırılmıştı. Her ne kadar Rus müdahalesiyle bu özgürlük talebi durdurulsa da halkın mücadele azmi tamamen yok edilememişti. Mesela 1918 yılından itibaren giderek ivme kazanan Şeyh Muhammed Hıyabanî Hareketi, bu özgürlük mücadelesinin yeniden başladığını göstermekteydi. Nitekim, Celil Mehmetkuluzade, Hıyabanî'nin başında bulunduğu Azerbaycan Demokrat Partisi'nin manifestosunu dergisinde yayınlıyacaktı. (Molla Nasreddin, 1917, S. 12: 2)

Güney Azerbaycan'da Şeyh Muhammed Hıyabanî bağımsızlık mücadelesi verirken kuzeyde ise 1918 yılında Azerbaycan Halk Cumhuriyeti kurulmuştur. Kuzeyde bağımsız bir cumhuriyet kurulurken Güney Azerbaycan'da da özgürlük mücadelesi önemli bir mesafe katetmiştir. Nitekim 7 Nisan 1920'de Hıyabanî, Tebriz'de kurulan Azerbaycan idaresinin adının *Azadistan Devleti* olduğunu bütün dünyaya ilan etmiştir. (Azeri, t.y: 167; Hasanzade, 1991: 15)

Kuzey ve Güney Azerbaycan, iki ayrı müstakil devlet biçiminde örgütlense de bu durum uzun sürmedi. 1920 yılında Sovyet ordusunun işgali ile yaklaşık iki yıl evvel kurulan Azerbaycan Halk Cumhuriyeti yıkıldı ve özellikle Azerbaycan basın dünyası açısından belirsiz ve zor bir dönem başladı. Nitekim Celil Mehmetkuluzade, kardeşi ve İran inkılabının savunucularından olan Mirza Aliekber Mehmetkuluzade'nin ısrarı sonrasında İran'a gitmeyi ve çok sevdiği dergisini orada yayınlamayı kabul etti. Tebriz'de geçirdiği günler, Celil Mehmetkuluzade'yi tüm Kafkasya'da meydana gelen sıkıntılı süreçten, siyasal ve toplumsal meselelerden kısa süreliğine de olsa uzaklaştıracaktı. Bu durum aynı zamanda Celil Mehmetkuluzade'nin Şeyh Muhammed Hıyabanî'nin Güney Azerbaycan'da kurduğu Azadistan Devleti'ne duyduğu sevgi ve ümitlerle de yakından ilgiliydi. Tebriz'de hakimiyet Hıyabanî taraftarlarının kontrolünde olsa da Güney Azerbaycan'ın pek çok bölgesinde siyasi çekişmelerin devam

etmesi sebebiyle yazar ve ailesinin Tebriz'e ulaşması 7 Eylül 1920 yılında mümkün olabilmıştır. (Hasanzade, 1991: 12-15)

Celil Mehmetkuluzade, ailesiyle birlikte Tebriz'e ulaştığı günlerde, kardeşi Mirza Aliekber'le birlikte Şeyh Muhammed Hıyabanî ile görüşmek üzere ziyarette bulunmuş ancak dergisinin neşri için kesin bir cevap alamamıştı. (Mamedkulizade, 1970: 98-99) Bu ziyaretten kısa süre sonra Güney Azerbaycan'da bağımsızlık hareketini başlatmış olan Hıyabanî katledilmiş ve yönetim Şah taraftarlarının eline geçmişti. (Mehmetli, 1949: 106-107) Molla Nasreddin dergisinin Tebriz'de uzun yıllardan beri bilinmesi, kardeşi Mirza Aliekber'in Tebriz inkılapçılarına verdiği destek ve iktidar değişikliği Celil Mehmetkuluzade ve ailesinin can güvenliğini de tehdit etmekteydi. (Cavanşir, 2012: 254) Bu durum Mehmetkuluzade'yi çok üzse de amacından asla vazgeçmemiş ve derginin yayınlanması için çaba göstermeyi sürdürmüştür.

Dergisini, Tebriz'de yayınlamadan önceki hazırlık döneminde pek çok zorlukla karşılaşan Celil Mehmetkuluzade, matbaanın oluşturulması, dergiyle adeta özdeş hale gelmiş olan renkli karikatürleri çizerek olan maharetli bir çizerin bulunması, para ve kâğıt işlerinin halledilmesi konusunda Ebülfeth Elevi başta olmak üzere İranlı dostlarından destek görmüştür. Derginin karikatürleri bu defa Seyid Muhammed Ali Behzat tarafından çizilmiştir. Derginin Tiflis'te yayınlanan sayılarında büyük katkılar sunan Molla Nasreddin'in yazar kadrosu Tebriz sayılarında mevcut durum sebebiyle yer bulamamıştır. Tebriz sayıları incelendiğinde Celil Mehmetkuluzade'nin eski kalem arkadaşlarının gizli imzalarından faydalanarak çok fazla yazı yazdığı anlaşılmaktadır. Böylece Mehmetkuluzade 1906 yılından beri dergiyi yakından takip eden İranlı kardeşlerinin dergiyle olan ilişkilerinin devam etmesini, tanıdık imzalar aracılığıyla yapmaya çalışmıştır. (Hasanzade 1991: 27-31)

Molla Nasreddin'in Tebriz'de yayınlanmasında Teceddüd gazetesi redaktörü Ebülfeth Elevi önemli bir role sahiptir. Ebülfeth Elevi, Celil Mehmetkuluzade'nin vali ve onun müşavirleriyle görüşmesine aracılık etmiş, bu defa da derginin Farsça yayınlanması konusu gündeme gelmiştir. Mehmetkuluzade, Kuzey ve Güney Azerbaycan ahalisinin Türk olduğunu, 15 sene boyunca dergisini Türkçe yayınladığını dile getirmiş ve dergisini halkın aydınlanması için yayınladığını söylemiştir. Şehrin valisi Muhbir-üs-Saltana Hidayet'ten aldığı izinle baş makale dışında derginin Türkçe yayınlanması mümkün olmuştur. (Cavanşir 2012: 267-268; Hasanzade 1991: 26-27) Birkaç ay devam eden mücadele sonrasında derginin ilk sayısı 19 Şubat 1921 tarihinde yayınlanmış ve bin nüsha olarak basılmıştır. Aynı gün içinde 600 adet Molla Nasreddin nüshası Tebriz sokaklarında ve pazarlarında satılmıştır. (Mamedkulizade 1970: 111) Söz konusu dönemde Tebriz'de yayınlanan tüm gazetelerin tamamının tirajı Molla Nasreddin'den azdı. Bu durum halkın dergiye duyduğu sevginin bir göstergesidir. (Hasanzade 1991: 35)

Dergi, Tebriz toplumsal hayatının aynası olmuştur. İlk sayıdan itibaren başta Tebriz olmak üzere Güney Azerbaycan'daki halkı istismar edenler ve halkın zorluklarla dolu yaşamını daha da zorlaştıranlar yine Molla Nasreddin'in hedefindeydi. Behzat tarafından çizilen bir karikatürde, İran devletinin paralarının işini yapmayan, tüm gününü uyuklayarak geçiren memurlara verilmesini eleştiren bir üslup hakimdir. (Molla Nasreddin, 1299, S. 1: 8) Burada yayınlanan bir yazıda yazar, Tebriz mahallelerinde boş gezen insanların çokluğuna değinirken yabancı konsolosların Azerbaycan hükümetiyle bağlantı kurduğu kârgüzarhâne isimli kurumdan bahsetmiş ve bu kadar mühim bir kurumda çalışanların bir kısmının nargile içtiklerini veya uyukladıklarını dile getirmiştir. Oysa Celil Mehmetkuluzade'ye göre sayıları bir

elin parmağını geçmeyen konsolosla muhatap olmak için sadece bir memurun istihdam edilmesi yeterli olacaktır. (Molla Nasreddin, 1299, S. 1: 6)

İlk sayının yayınlanması, doğal olarak ciddi ses getirmiş ve özellikle iktidar sahipleri derginin kapatılması için derhal harekete geçmiştir. Ancak bazı etkili isimlerin araya girmesiyle dergi kapatılmaktan kurtulmuştur. (Mehmetli, 1982: 356-357; Hasanzade, 1991: 41) Nitekim 9 Mart'ta (1921) ikinci, 20 Mart'ta üçüncü, 31 Mart'ta dördüncü sayıları yayınlanmıştır. 10 ve 23 Nisan tarihlerinde beşinci ve altıncı sayıları, 7 Mayıs'ta yedinci, 15 Mayıs'ta ise sekizinci ve son sayısı yayınlanmıştır. Derginin birinci ve ikinci sayıları Hüseyini matbaasında, diğer altı sayısı ise Ümid matbaasında neşredilmiştir. Bu bilgi derginin yedinci sayfasında yer almıştır. Tebriz sayılarında yer alan baş makale, ilan ve haberler Elevi'ye aittir. Yine yazıları yayınlanan İskenderhan Gaffari Sürhpuş ise derginin Tiflis sayılarından tanıdık bir simadır ve yazılarını genellikle müstear isimle yayınlamıştır. Azerbaycan'ın meşhur şairlerinden Mirza Aliekber Sâbir geleneğini Tebriz'de devam ettiren Mirza Ali Möcüz Şebüsterî olmuştur. Şebüsterî, dergide satirik şiirlerini *Kabla Hahverdi* ve *Taze Şair* mahlasıyla yayınlamıştır. (Babayeva, 2020: 13) Şairin satirik şiirleri derginin Tebriz'de yayınlanan yedinci sayısı hariç tüm sayılarında yer almıştır. Möcüz Şebüsterî, yanlış bilindiği üzere Tebriz'de yayınlanan beşinci sayıda yer alan Hamamlarımız şiiriyle değil, daha ilk sayıda Edebiyat başlığı altında yer alan şiiriyle dergiye katkı vermeye başlamıştır. (XX. Asır Azerbaycan Edebiyatının Meseleleri, 1985: 178)

Derginin ikinci sayısında yayınlanan bir yazıda, İran'ın 150 yıl öncesinden haber verilerek aradan uzun yıllar geçmesine rağmen hala güçlünün zayıfı ezdiğini, hürriyetin olduğu devletlerde fırkaların (partilerin) birbirini desteklediğini, hatta kuvvet bulup hükümet kurduklarında diğer fırkaları yok etmek yerine o fırkalardan üye talep ederek memleketi koalisyonla idare ettikleri belirtilir. Oysa İran'da uzun yıllardan beri hiçbir şey değişmemektedir. (Molla Nasreddin, 1299, S. 2: 3) Eleştirel üslubun devam ettiği diğer bir yazıda ise şehrimizde yardımcı olmak için muhtaç bir insan aradım ama bulamadım sözleriyle Tebriz'de açların ve dilencilerin ne kadar fazla olduğu ironik biçimde anlatılmaktadır. (Molla Nasreddin, 1299, S. 3: 3)

Derginin, yayın hayatına başladığı ilk günden itibaren benimsediği muhalif ve eleştirel tavrın Tebriz'de de sürdürülmesi, ilk sayıdan itibaren popüler bir yayın haline gelmesini sağlamıştır. Nitekim Tebriz başta olmak üzere dergi dönemi için önemli sayılabilecek rakamlarda bir okur ve abone kitlesine kavuşmuştur. Ancak derginin dördüncü sayısında çıkan bir yazıdan anlaşıldığı kadarıyla özellikle Tebriz dışındaki abonelere derginin ulaştırılması posta sisteminin yavaşlığı yüzünden mümkün olmamıştır. İlgili yazıda bu durumdan şikâyet edilerek derginin daha birinci ve ikinci sayılarının bile Tebriz postanesinden yola çıkmadığı belirtilmiş ve postanelerin bu kadar düzensiz işleyişinin vatanseverleri üzdüğü vurgulanmıştır. (Molla Nasreddin, 1339, S. 4: 3)

Postaneler konusundaki bu şikâyet, aslında derginin İran'daki yapı veya sisteme dönük eleştirilerinin çok küçük bir ayrıntısından ibarettir. Zira dergide, meşrutiyet dönemi de dahil olmak üzere halkın perişan halinden kurtulması için kimsenin herhangi bir çaba göstermediği belirtilmiştir. Hatta Tebriz'de artık *ittihad* ve *ittifak* kelimelerinin ağza bile alınmadığının altı çizilmiştir. (Molla Nasreddin, 1339, S. 4: 5-6) Dergide çıkan yazılarda Tebriz'in sahipsiz kaldığı ve halkın içler acısı halinden kurtulmak için başvuracağı tek bir makamın olmadığı büyük bir üzüntüyle dile getirilir. (Molla Nasreddin, 1339, S. 5: 6) Derginin önemli yazarları arasında yer alan Şebüsteri de bir şiirinde hamamları konu edinmiş ve

hamamlardaki aşırı kirlilik ile kültürel gerilik ve cehalet arasında doğrudan bir ilişki kurmuştur. (Molla Nasreddin, 1339, S. 5: 3) Şebüsteri'nin hamamlar konusundaki yorumuna Mehmetkuluzade de bir sonraki sayıda destek vererek etrafa yaydıkları kokunun dayanılmayacak derecede kötü olduğunu belirtmiştir. (Molla Nasreddin, 1339, S. 6: 7) Ancak yukarıda belirtildiği gibi hem postane hem de hamam gibi halkın gündelik yaşamını ilgilendiren konular, dergi yazarlarına göre istisnai kabul edilerek geçirtilirilecek sorunlar değildir. Mehmetkuluzade başta olmak üzere diğer yazarlar için de bütün bu sorunların kaynağında, köhnemiş siyasi ve toplumsal yapı bulunmaktadır.

Molla Nasreddin'in, 1906 yılında Tiflis'te başlayan serüveni 1921 yılı başlarında Tebriz'e taşınmış ve dergi, sahip olduğu etkiyi burada da sürdürmüştür. Baştan itibaren izlediği muhalif tavır, derginin Tebriz'de yayınlanan sayılarında da değişmeden devam etmiştir. Yukarıda belirtildiği gibi hayli yüksek sayılabilecek bir okur ve abone sayısına ulaşsa da dergi Tebriz'de yalnızca sekiz sayı yayınlanmış ve Celil Mehmetkuluzade'nin, Kafkas Azerbaycan Cumhuriyeti Maarif Müdürlüğü göreviyle Bakü'ye davet edilmesi derginin Tebriz serüveninin de bitmesine yol açmıştır. Mehmetkuluzade, konuyla ilgili olarak okurlarını bilgilendirmeyi derginin Tebriz'de yayınlanmasında emeği geçenler ve yardım edenlere teşekkür etmeyi de ihmal etmemiştir. (Molla Nasreddin, 1330, S. 8: 2)

SONUÇ VE TARTIŞMA

Molla Nasreddin dergisi 1906 yılında yayın hayatına başladığı andan itibaren hem Kuzey Azerbaycan hem de bütün Kafkasya'da yaşayan Türkler ve Müslümanlar arasında en popüler yayın organlarından biri olmuştur. Dergi, yayınlanmaya başladığı andan itibaren Azerbaycan'ı bir bütün olarak ele almış ve yalnızca Rus Çarlığı'nın hakimiyeti altında kalan bölgeyi değil İran hakimiyeti altında kalan Güney Azerbaycan'ı da neredeyse her sayısında konu edinmeye özen göstermiştir. Bölgedeki politik ve toplumsal sorunlar dergide yayınlanan yazıların ana temasını oluşturmuş ve muhalif bir yayın organı olarak İran Şahından başlayarak bütün idare köklü eleştirilere uğratılmıştır. Şahın kurduğu köhnemiş düzenin devamını veya meşruiyetini sağlayan ana tabaka olarak İran uleması da derginin cepheden mücadele ettiği grupların başında gelmiştir. Bu eskimiş düzenden kurtulmanın yolu ise ancak bütün halkın dayanışma içinde gerçekleştireceği bir özgürlük veya söz konusu tarihsel bağlam içinde bir meşrutiyet mücadelesi ile mümkün olacaktır. Nitekim dergi, Güney Azerbaycan'daki özgürlük ve meşrutiyet davasını hiç ihmal etmeden sayfalarına taşımaya büyük bir özen göstermiştir. Bu özgürlükçü ve muhalif/eleştirel tavır sebebiyle dergi, özellikle İran yönetimi tarafından yakından izlenmiş ve ülkeye girmemesi için büyük çaba harcanmıştır. Ancak bu çabalar, derginin etkisi ve okur sayısının azalmasına yol açmadığı gibi 1921 yılının başlarında Tebriz'de yayınlanmasına da engel olamamıştır. 1921 yılının Şubat ayında başlayan Tebriz macerası çok uzun sürmemiş ve dergi ancak sekiz sayı yayınlanabilmiştir. Her ne kadar Tebriz'de kısa bir yayın dönemi geçirse de Molla Nasreddin hem okur hem de abone sayısı açısından rakiplerini geride bırakmayı başarmıştır. Celil Mehmetkuluzade, 1906 yılında Tiflis'teki ilk sayı ile inşa ettiği muhalif ve eleştirel tavrı Tebriz sayılarında da değiştirmeden sürdürmüştür. Bu sayılarda çıkan yazılarda da dergi halkçı karakterini bütün berraklığıyla ortaya koyarken iktidar sahiplerine mesafeli duruş da aynıyla devam etmiştir. Bilhassa halkın içinde bulunduğu fakirlik, eğitimdeki gerilik ve vatanın sahipsizliği gibi temalar, Tebriz sayılarında da sıklıkla işlenmiştir. Buna karşın iktidar sahiplerinin vatan veya millet yerine makamı korumaya dönük hassasiyetleri de derginin Tebriz sayılarında dikkati çeken ve en sık tesadüf edilen başlıklar arasında yer almıştır.

KAYNAKÇA

- Azerbaycan Tarihi, I. Cilt.* (1994). Bakû: Azerbaycan Devlet Neşriyatı.
- Azeri, A. (t.y). *Azadistan Devleti ve Şeyh Muhammed Hıyabanî (1918-1920)*. Ankara.
- Babayeva, G. (2020). *Molla Nesreddin Jurnalı ve Milli Edebi Değerler*. Bakû: Elm ve Tahsil.
- Babayeva, G., (2021). “Molla Nesreddin Edebi Mektebinin Cenubî Azerbaycan’da Yaranan Satira Ananelerinin Formalaşmasına Tesiri”. *Azerbaycan Milli Elmler Akademiyası, Filologiya ve Senetşünaslığı, Azerbaycan Milli Elmler Akademiyası*. S. 2, s. 53-59.
- Babayeva, G.. (2023). “Alikulu Gamküsar ve Molla Nasreddin Satirik Jurnalı”. *AMEA, Nizami Gencevi Adına Edebiyat İnstitutu, Azerbaycan Edebiyatşünaslığı*. S. 1, s. 184-193.
- Caferov, M. (1966). *Celil Mehmetkuluzade*. Bakû: Azerbaycan Devlet Neşriyatı.
- Cavanşir, H.H. (2012). *Hatıralarım*, (M Vezir, Çev.). Bakû: Apostroff.
- Cenubî Azerbaycan Tarihinin Oçerki*. (1985). Bakû: Elm Neşriyatı.
- Ferhadov, A. (2020). “Molla Nasreddin Jurnalı ve Cenubî Azerbaycan Tarihi”. *Pedagoji Universitetin Haberleri, Humanitar, İctimai ve Pedagoji-Psikoloji Elmler Seriyası*.C.68, S.2, s. 82-91.
- Habibbeyli, İ. (1994). *Celil Mehmetkuluzade*. Bakû: Şark- Garp.
- Habibbeyli, İ. (2009). *Celil Mehmetkuluzade: Muhiti ve Muasırları*. Nahçıvan: Ecemi.
- Habibbeyli, İ. (2009). “Molla Nasreddincilik Talimi ve Muasırlık”. *Azerbaycan Gazetesi*. (7 Nisan 2009), s.6.
- Habibbeyli, İ. (2016). “Molla Nasreddin Edebi Mektebi ve Molla Nasreddincilik”. *Azerbaycan Gazetesi*. (7 Nisan 2016), s.7.
- Hasanzade, T (1991). *Celil Mehmetkuluzade’nin Cenub Seferi ve ‘Molla Nasreddin’ Jurnalının Tebriz’de Neşri*. Bakû: Elm Neşriyatı.
- Kesrevi, A. T. (2003). *İran’ın Meşruta İnkılabının Tarihi, C. I.* (A. E. H. Cavanşir, Çev.). Essen.
- Mamedkulizade, G. (1970). *Moi Vospominaniya O Djalile Mamedkulizade*. Bakû: İzdatelstvo Elm.
- Mehmedov, K. (1989). *XX. Asır Azerbaycan Güllüşü*, Bakû: Yazıcı Neşriyatı.
- Mehmetkuluzade, C. (1951). *Eserleri, I. Cilt*. Bakû: Azerneşir.
- Mehmetkuluzade, C. (1961). *Felyetonlar, Makaleler*. Bakû: ADU Neşriyatı.
- Mehmetkuluzade, C. (1967). *Hatıralar, Makaleler*. Bakû.
- Mehmetli, G. (1949). *Hıyabanî*. Bakû: Azerneşir.
- Mehmetli, G. (1984). *Molla Nasreddin*. Bakû: Gençlik.

Mirahmedov, A. (1958). *Sâbir*. Bakû: Azərbaycan Elmler Akademiyası Neşriyatı.

Molla Nasreddin Dergisi

Nemanzade, Ö. F. (1983). *Eserleri*. Bakû: Yazıcı Neşriyatı.

Paşayev, A. (2010). *Molla Nasreddin: Dostları, Düşmanları*. Bakû: Çarşıoğlu Neşriyatı.

Sâbir, M. A. E. (1961). *Makaleler Mecmuası*, Bakû: Azərbaycan Elmler Akademiyası Neşriyatı.

Sohrabi, N. (2024). *Osmanlı İmparatorluğu ve İran'da Devrim ve Meşrutiyet*. (Ü. E. Uysal, Çev.)
İstanbul: İş Bankası.

Şerif, A. (1946). *Molla Nasreddin (Celil Mehmetkuluzade)*. Bakû: Azərneşir.

Şerif, A. (1986). *Molla Nasreddin Nece Yarandı*. Bakû: Azərneşir.

Yirminci Asır Azərbaycan Edebiyatının Meseleleri. (1985). Bakû: Elm Neşriyatı.

Zamanov, A. (1979). *Emel Dostları*. Bakû.

Fizik Eğitiminde Güncel Dijital Teknolojilerin Kullanımı Üzerine Makalelerin İçerik Analizi

Mojtaba Abdollahzadeh, Dr. Volkan Damlı

1.E-mail:Poroton4347@gmail.com

2.E-mail:Volkandamlı@gmail.com

Gazi Üniversitesi, Eğitim Bilimleri Enstitüsü
Matematik ve Fen Bilimleri Eğitimi Anabilim Dalı, Fizik Eğitimi Bilim Dalı

Özet

Bu araştırmanın amacı, 2020-2025 yılları arasında fizik eğitiminde güncel dijital teknolojilerin (Yapay Zekâ, Artırılmış Gerçeklik, Sanal Gerçeklik, Sanal Laboratuvarlar ve Dijital Simülasyonlar) kullanımını konu edinen makalelerin eğilimlerini ve ulaştıkları sonuçları içerik analizi yöntemiyle incelemektir. Bu doğrultuda, yüksek etki değerli (Q1-Q2) dergilerde yayımlanan toplam 102 akademik makale; yazar sayısı, yayın yılı, proje desteği, teknoloji türü, araştırma yöntemi, veri toplama aracı, örneklem türü/büyüklüğü, veri analiz yöntemi, ulaşılan sonuçlar ve sunulan öneriler olmak üzere 10 farklı alt problem çerçevesinde sistematik olarak analiz edilmiştir.

Verilerin çözümlenmesinde frekans ve yüzde değerleri kullanılarak betimsel istatistiklere yer verilmiş, elde edilen nicel bulgular alan yazındaki ilgili teorik çerçevelerle desteklenerek yorumlanmıştır. Araştırma sonuçlarına göre; fizik eğitimi literatüründeki teknolojik dönüşümün 2024 ve 2025 yıllarında ivme kazandığı, tekil yazar yerine çoğunlukla 3 ve üzeri yazarlı iş birliğine dayalı ekiplerce yürütüldüğü ve çalışmaların büyük bir kısmının (%56,9) kurumsal fonlarla desteklendiği saptanmıştır. Teknolojik eğilimler bağlamında literatürün geleneksel simülasyonlardan Yapay Zekâ (AI/LLM) odaklı çalışmalara doğru keskin bir yönelim artışı (%35,3) olduğu belirlenmiştir. Metodolojik olarak betimsel (%19,6) ve deneysel (%17,6) desenlerin ağırlıkta olduğu, veri toplama sürecinde çoklu araç kullanımının (çeşitleme) tercih edildiği ve analizlerin genellikle istatistiksel metotlarla (%38,2) yürütüldüğü görülmüştür. Ayrıca yapay zekâ testlerinin artmasıyla birlikte “insan örneklem barındırmayan” (%29,4) makine performans çalışmalarının literatürde yeni bir çalışma alanı oluşturmaya başladığı tespit edilmiştir.

İncelenen makalelerin büyük bir çoğunluğu, dijital teknolojilerin fizik eğitiminde başarı ve performansı (%44,1) ile görselleştirme avantajını (%20,6) anlamlı düzeyde artırdığını raporlamıştır. Ancak, teknolojinin teknik başarısına rağmen araştırmacıların en çok Öğretmen Eğitimi (%17,6) ve Teknoloji Entegrasyonu (%17,6) yönünde öneriler sunduğu görülmüştür. Bu durum, fizik eğitimindeki

dijitalleşmenin sürdürülebilirliğinin donanımdan ziyade, öğretmenlerin teknolojik pedagojik alan bilgisi (TPACK) düzeylerine ve öğretim tasarımı becerilerine bağlı olduğunu ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Fizik eğitimi, güncel dijital teknolojiler, içerik analizi.

Abstract

This study aims to examine the trends and findings of articles published between 2020 and 2025 on the use of current digital technologies in physics education, including Artificial Intelligence, Augmented Reality, Virtual Reality, Virtual Laboratories, and Digital Simulations, through content analysis. In this context, 102 articles published in high-impact Q1–Q2 journals were systematically analyzed according to 10 sub-problems: number of authors, publication year, project support, technology type, research method, data collection tool, sample type and size, data analysis method, reported findings, and recommendations.

The data were analyzed using frequency and percentage values, and the quantitative findings were interpreted in relation to relevant theoretical frameworks. The results showed that technological transformation in physics education gained momentum in 2024 and 2025; most studies were conducted by collaborative teams of three or more authors; and more than half of the studies (56.9%) received institutional funding.

In terms of technology type, the literature showed a clear shift from traditional simulations toward Artificial Intelligence (AI/LLM)-focused studies (35.3%). Methodologically, descriptive (19.6%) and experimental (17.6%) designs were most common; multiple data collection tools were frequently used; and statistical analysis methods were dominant (38.2%). In addition, the rise of artificial intelligence studies led to the emergence of machine performance studies without human samples (29.4%) as a new research area.

Most of the examined articles reported that digital technologies improved achievement and performance in physics education (44.1%) and provided visualization advantages (20.6%). However, despite their technical success, the most common recommendations focused on Teacher Education (17.6%) and Technology Integration (17.6%). This suggests that the sustainability of digitalization in physics education depends more on teachers' Technological Pedagogical Content Knowledge (TPACK) and instructional design skills than on hardware alone.

Keywords: Physics education, current digital technologies, content analysis.

1. Giriş

Fizik eğitimi, öğrencilerin doğa olaylarını bilimsel kavramlar, yasalar, modeller ve kanıtlar aracılığıyla anlamlandırmasını amaçlayan temel bir eğitim alanıdır. Bu alan yalnızca fiziksel formüllerin öğrenilmesini değil; fiziksel olayların yorumlanmasını, değişkenler arasındaki ilişkilerin kurulmasını,

deneysel verilerin değerlendirilmesini ve bilimsel düşünme becerilerinin geliştirilmesini de gerektirir. Fizik konularının önemli bir bölümü soyut ve doğrudan gözlenmesi güç süreçler içerdiğinden, öğrenciler bu alanda çeşitli öğrenme güçlükleri yaşayabilmektedir (Hestenes ve ark., 1992; Vosniadou, 2007).

Elektrik alanı, manyetik alan, kuvvet, enerji, dalga hareketi, optik olaylar ve atomik düzeyde gerçekleşen süreçler, öğrencilerin günlük deneyimleriyle doğrudan ilişkilendirmekte zorlanabileceği kavramlar arasında yer almaktadır. Bu nedenle fizik öğretiminde yalnızca sözel anlatım veya matematiksel işlem temelli açıklamalar çoğu zaman yeterli olmamakta; görselleştirme, etkileşim, modelleme ve deneyimsel öğrenme süreçleri önem kazanmaktadır (Mayer, 2014; Wieman ve ark., 2010).

Güncel dijital teknolojiler, fizik eğitiminde bu güçlüklerin aşılmasına katkı sağlayabilecek önemli araçlar sunmaktadır. Simülasyonlar, öğrencilerin fiziksel değişkenleri kontrollü biçimde değiştirmelerine ve sonuçları gözlemlemelerine olanak tanırken; sanal laboratuvarlar deneysel süreçlerin güvenli, tekrar edilebilir ve erişilebilir biçimde yürütülmesini desteklemektedir (Finkelstein ve ark., 2005; Wieman ve ark., 2010). Artırılmış gerçeklik ve sanal gerçeklik uygulamaları, soyut fiziksel süreçlerin üç boyutlu ve etkileşimli biçimde sunulmasına katkı sağlamaktadır (Azuma, 1997; Akçayır ve Akçayır, 2017; Merchant ve ark., 2014).

Son yıllarda yapay zekâ ve büyük dil modelleri de fizik eğitiminde problem çözme, otomatik geri bildirim, öğrenci yanıtlarının analizi ve öğretim materyali geliştirme gibi alanlarda yeni olanaklar oluşturmuştur. Bununla birlikte, bu araçların doğruluk, güvenilirlik, etik kullanım ve pedagojik uygunluk açısından dikkatle değerlendirilmesi gerekmektedir (Kasneci ve ark., 2023). Bu çalışma, fizik eğitiminde güncel dijital teknolojilerin kullanımına ilişkin yüksek etki değerli dergilerde yayımlanan makaleleri içerik analizi yöntemiyle inceleyerek alandaki temel eğilimleri belirlemeyi amaçlamaktadır.

2. Araştırmanın Amacı

Bu araştırmanın amacı, 2020-2025 yılları arasında fizik eğitiminde güncel dijital teknolojilerin kullanımını konu alan akademik makalelerin genel eğilimlerini belirlemektir. Bu amaç doğrultusunda incelenen makaleler; yazar sayısı, yayın yılı, proje desteği, teknoloji türü, araştırma yöntemi, veri toplama aracı, örneklem türü, örneklem büyüklüğü, veri analiz yöntemi, ulaşılan önemli sonuçlar ve sunulan öneriler bakımından analiz edilmiştir.

Araştırmanın temel problem cümlesi şu şekilde belirlenmiştir: 2020-2025 yılları arasında SSCI kapsamında taranan Q1 ve Q2 düzeyindeki dergilerde yayımlanan ve fizik eğitiminde güncel dijital teknolojilerin kullanımını konu alan makalelerin genel özellikleri nelerdir?

3. Yöntem

Bu araştırma, doküman incelemesine dayalı bir içerik analizi çalışmasıdır. İçerik analizi, belirli bir doküman grubunun sistematik biçimde incelenmesine, sınıflandırılmasına ve yorumlanmasına olanak sağlayan bir araştırma yaklaşımıdır (Krippendorff, 2018; Kuckartz, 2019). Bu çalışmada analiz birimini, fizik eğitiminde güncel dijital teknolojilerin kullanımını konu alan akademik makaleler oluşturmuştur.

Araştırmanın çalışma materyali, 2020-2025 yılları arasında SSCI kapsamında taranan Q1 ve Q2 düzeyindeki 24 dergide yayımlanan makalelerden oluşmaktadır. İlk tarama sonucunda 359 makaleye ulaşılmıştır. Daha sonra başlık, özet, anahtar kelimeler, yöntem ve tam metin incelemeleri yapılmış; araştırmanın dâhil etme ve dışlama ölçütlerine uygun bulunan 102 makale analiz kapsamına alınmıştır.

Makaleler, araştırma için hazırlanan kod kitabı doğrultusunda sistematik biçimde kodlanmıştır. Kodlama boyutları; yazar sayısı, yayın yılı, proje desteği, teknoloji türü, araştırma yöntemi, veri toplama aracı, örneklem türü, örneklem büyüklüğü, veri analiz yöntemi, önemli sonuçlar ve öneriler olarak belirlenmiştir. Verilerin analizinde frekans ve yüzde değerleri kullanılmıştır.

4. Bulgular

Araştırma bulguları, fizik eğitiminde güncel dijital teknolojilere yönelik çalışmaların özellikle son yıllarda yoğunlaştığını göstermektedir. Yayın yılına göre dağılım incelendiğinde, 2024 ve 2025 yıllarında belirgin bir artış olduğu görülmüştür. Bu durum, dijitalleşme sürecinin ve özellikle yapay zekâ temelli teknolojilerin fizik eğitimi araştırmalarına güçlü biçimde yansıdığını göstermektedir.

Yazar sayısı açısından incelenen makalelerin büyük bölümünün tekil çalışmalardan ziyade çok yazarlı ekipler tarafından yürütüldüğü belirlenmiştir. Proje desteği bakımından incelenen makalelerin %56,9'unun kurumsal fonlarla desteklendiği görülmüştür. Bu bulgu, dijital teknoloji temelli fizik eğitimi çalışmalarının çoğu zaman teknik altyapı, yazılım, donanım, uygulama geliştirme veya deneysel süreçler gerektirmesiyle açıklanabilir (Akçayır ve Akçayır, 2017; Merchant ve ark., 2014).

Teknoloji türleri açısından en dikkat çekici bulgu, yapay zekâ ve büyük dil modellerine yönelik çalışmaların son yıllarda hızlı biçimde öne çıkmasıdır. Yapay zekâ ve LLM odaklı çalışmaların oranı %35,3 olarak belirlenmiştir. Bu durum, fizik eğitimi araştırmalarında geleneksel simülasyonlardan yapay zekâ temelli uygulamalara doğru belirgin bir yönelim olduğunu göstermektedir (Kasneci ve ark., 2023).

Araştırma yöntemleri bakımından betimsel (%19,6) ve deneysel (%17,6) çalışmaların öne çıktığı görülmüştür. Veri analiz yöntemlerinde istatistiksel analizler %38,2 oranıyla ağırlık kazanmıştır. Ayrıca yapay zekâ temelli araştırmaların artmasıyla birlikte insan örneklem içermeyen makine performans çalışmalarının %29,4 oranında temsil edildiği belirlenmiştir.

İncelenen makalelerde ulaşılan önemli sonuçlar değerlendirildiğinde, dijital teknolojilerin fizik eğitiminde en çok başarı ve performans artışıyla ilişkilendirildiği belirlenmiştir (%44,1). Ayrıca görselleştirme avantajı da %20,6 oranıyla öne çıkmıştır. Öneriler bakımından ise öğretmen eğitimi (%17,6) ve teknoloji entegrasyonu (%17,6) en sık vurgulanan alanlar arasında yer almıştır.

5. Tartışma

Araştırma bulguları, fizik eğitiminde güncel dijital teknolojilerin giderek daha merkezi bir araştırma alanı hâline geldiğini göstermektedir. Özellikle 2024 ve 2025 yıllarında yayın sayısındaki artış, dijitalleşme sürecinin fizik eğitimi literatürüne güçlü biçimde yansıdığını ortaya koymaktadır.

Yapay zekâ ve büyük dil modellerine yönelik çalışmaların artması, fizik eğitiminde yeni bir araştırma yönelimine işaret etmektedir. Bu teknolojiler; problem çözme, otomatik geri bildirim, öğretim materyali geliştirme, öğrenci yanıtlarının analizi ve öğrenme süreçlerinin kişiselleştirilmesi gibi alanlarda önemli fırsatlar sunmaktadır. Ancak bu araçların doğruluk, güvenilirlik, etik kullanım ve pedagojik uygunluk açısından dikkatle değerlendirilmesi gerekmektedir (Kasneci ve ark., 2023).

Araştırmada dijital teknolojilerin başarı, performans, görselleştirme ve motivasyon açısından olumlu sonuçlarla ilişkilendirilmesi, bu araçların fizik öğrenme sürecini destekleyebileceğini göstermektedir. Fizik gibi soyut kavramların yoğun olduğu bir alanda, etkileşimli ve görsel destek sağlayan dijital ortamlar öğrencilerin kavramları daha anlamlı biçimde yapılandırmasına katkı sağlayabilir (Mayer, 2014; Wieman ve ark., 2010).

Bununla birlikte, araştırmalarda öğretmen eğitimi ve teknoloji entegrasyonuna yönelik önerilerin öne çıkması, teknolojinin tek başına yeterli olmadığını göstermektedir. Dijital araçların etkili olabilmesi için öğretmenlerin bu araçları pedagojik amaçlara uygun biçimde kullanabilmeleri gerekir. Bu bağlamda teknolojik pedagojik alan bilgisi, fizik eğitiminde dijitalleşmenin sürdürülebilirliği açısından temel bir yeterlik alanı olarak değerlendirilebilir (Mishra ve Koehler, 2006).

6. Sonuç ve Öneriler

Bu araştırmada, 2020-2025 yılları arasında fizik eğitiminde güncel dijital teknolojilerin kullanımını konu alan 102 akademik makale içerik analizi yöntemiyle incelenmiştir. Araştırma sonuçları, fizik eğitiminde dijital teknoloji çalışmalarının özellikle son yıllarda arttığını ve yapay zekâ temelli çalışmaların dikkat çekici biçimde öne çıktığını göstermektedir.

Sonuçlara göre, dijital teknolojiler fizik eğitiminde başarı, performans, kavramsal anlama, görselleştirme, etkileşim ve motivasyon açısından önemli katkılar sunmaktadır. Bununla birlikte, bu katkılarının sürdürülebilir olabilmesi için öğretmen eğitimi, pedagojik tasarım, teknoloji entegrasyonu ve ölçme-değerlendirme süreçlerinin birlikte ele alınması gerekmektedir.

Araştırma sonuçları doğrultusunda fizik öğretmenleri dijital teknoloji kullanımı konusunda pedagojik temelli hizmet içi eğitimlerle desteklenmelidir. Yapay zekâ, artırılmış gerçeklik, sanal gerçeklik ve simülasyon uygulamaları fizik öğretim programlarıyla uyumlu biçimde tasarlanmalıdır. Dijital teknolojilerin yalnızca akademik başarıya değil; kavramsal anlama, motivasyon, öz-yeterlik ve bilimsel süreç becerilerine etkisi de bütüncül biçimde değerlendirilmelidir.

Sonuç olarak bu çalışma, fizik eğitiminde güncel dijital teknolojilere ilişkin literatürün genel eğilimlerini ortaya koymakta ve gelecekte yapılacak araştırmalara yöntem, teknoloji seçimi ve pedagojik entegrasyon açısından yol gösterici bir çerçeve sunmaktadır.

Kaynakça

Akçayır, M., & Akçayır, G. (2017). Advantages and challenges associated with augmented reality for education: A systematic review of the literature. *Educational Research Review*, 20, 1–11.
<https://doi.org/10.1016/j.edurev.2016.11.002>

- Azuma, R. T. (1997). A survey of augmented reality. Presence: Teleoperators and Virtual Environments, 6(4), 355–385. <https://doi.org/10.1162/pres.1997.6.4.355>
- Finkelstein, N. D., Adams, W. K., Keller, C. J., Kohl, P. B., Perkins, K. K., Podolefsky, N. S., Reid, S., & LeMaster, R. (2005). When learning about the real world is better done virtually: A study of substituting computer simulations for laboratory equipment. Physical Review Special Topics - Physics Education Research, 1(1), 010103. <https://doi.org/10.1103/PhysRevSTPER.1.010103>
- Hattie, J., & Timperley, H. (2007). The power of feedback. Review of Educational Research, 77(1), 81–112. <https://doi.org/10.3102/003465430298487>
- Kasneci, E., Sessler, K., Küchemann, S., Bannert, M., Dementieva, D., Fischer, F., Gasser, U., Groh, G., Günnemann, S., Hüllermeier, E., Krusche, S., Kutyniok, G., Michaeli, T., Nerdel, C., Pfeffer, J., Poquet, O., Sailer, M., Schmidt, A., Seidel, T., Stadler, M., Weller, J., Kuhn, J., & Kasneci, G. (2023). ChatGPT for good? On opportunities and challenges of large language models for education. Learning and Individual Differences, 103, 102274. <https://doi.org/10.1016/j.lindif.2023.102274>
- Krippendorff, K. (2018). Content analysis: An introduction to its methodology (4th ed.). Sage.
- Kuckartz, U. (2019). Qualitative text analysis: A systematic approach. In G. Kaiser & N. Presmeg (Eds.), Compendium for early career researchers in mathematics education (pp. 181–197). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-15636-7_8
- Mayer, R. E. (2014). The Cambridge handbook of multimedia learning (2nd ed.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139547369>
- Merchant, Z., Goetz, E. T., Cifuentes, L., Keeney-Kennicutt, W., & Davis, T. J. (2014). Effectiveness of virtual reality-based instruction on students' learning outcomes in K–12 and higher education: A meta-analysis. Computers & Education, 70, 29–40. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2013.07.033>
- Mishra, P., & Koehler, M. J. (2006). Technological pedagogical content knowledge: A framework for teacher knowledge. Teachers College Record, 108(6), 1017–1054. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9620.2006.00684.x>
- Wieman, C. E., Adams, W. K., & Perkins, K. K. (2010). PhET: Simulations that enhance learning. Science, 322(5902), 682–683. <https://doi.org/10.1126/science.1161948>

Günümüz Türk Sanatında Kitsch'in Görünümleri: Reflektif Kullanım İle Yüzeysel Estetik Arasında

Zehra Gülen Turan¹, Ayça TUFAN BAKNALI²

¹E-mail: zehragturan@gmail.com; Yıldız Teknik Üniversitesi, Sanat ve Tasarım Fakültesi, Sanat Bölümü, İstanbul/ Türkiye.

²E-mail: atufan@yildiz.edu.tr; Yıldız Teknik Üniversitesi Üniversitesi, Sanat ve Tasarım Fakültesi, Sanat Bölümü, İstanbul/ Türkiye.

Özet

Bu çalışma, kitsch estetiğin günümüz Türk sanatındaki kullanım biçimlerini reflektif ve yüzeysel yaklaşımlar üzerinden incelemeyi amaçlamaktadır. Kitsch kavramının ortaya çıkışı, modernist estetik içerisindeki konumlanışı ve postmodern dönemde geçirdiği dönüşüm kuramsal bir çerçevede ele alınmıştır. Modernist yaklaşımın kitsch'i yüksek sanatın karşısında konumlandırarak dışlayıcı tutumuna karşılık, postmodernizm bu katı ayrımları bulanıklaştırarak kitsch'in yeniden değerlendirilmesine olanak tanımıştır. Bu bağlamda kitsch, yalnızca kötü zevkin bir göstergesi olarak değil, sanatçılar tarafından bilinçli biçimde kullanılan bir ifade aracı olarak ele alınmaktadır. Çalışma kapsamında Ali Elmacı, Emre Yusufi, Sertap Yeğin ve Uğur Acil'in üretimleri nitel analiz yöntemiyle incelenmiş; bu sanatçıların kitsch estetiği farklı biçimlerde kullandıkları tespit edilmiştir. İnceleme sonucunda kitsch'in güncel sanat içerisinde tekil ve sabit bir yapı sergilemediği; reflektif ve eleştirel kullanımlar ile yüzeysel ve tekrar odaklı üretimler arasında değişkenlik gösterdiği ortaya konulmuştur. Bu bağlamda kitsch, güncel sanat pratiklerinde yalnızca estetik bir kategori değil, aynı zamanda sanatçının izleyiciyle kurduğu ilişkinin niteliğini belirleyen bir strateji olarak değerlendirilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Kitsch, Güncel Türk sanatı, Modernizm, Postmodernizm, Reflektif, Yüzeysel estetik

Abstract

This study aims to examine the modes of use of kitsch aesthetics in contemporary Turkish art through reflective and superficial approaches. The historical emergence of the concept of kitsch, its position within modernist aesthetics, and its transformation in the postmodern period are discussed within a theoretical framework. While modernist discourse positioned kitsch in opposition to high art, postmodernism has blurred these rigid distinctions and enabled a reconsideration of kitsch. In this context, kitsch is approached not merely as an indicator of bad taste, but as a form of expression consciously employed by artists. Within the scope of the study, the works of Ali Elmacı, Emre Yusufi, Sertap Yeğin, and Uğur Acil are analyzed through a qualitative method. The findings indicate that kitsch does not manifest as a singular and fixed structure in contemporary art; rather, it varies between reflective and critical uses and more superficial, repetition-based forms of production. Accordingly,

kitsch can be understood not only as an aesthetic category but also as a strategy that shapes the nature of the relationship between the artwork and the viewer.

Keywords: Kitsch, Contemporary Turkish Art, Modernism, Postmodernism, Reflective, Superficial aesthetics

1. GİRİŞ

Kitsch kavramı uzun yıllar boyunca kötü beğeni ve düşük estetik ile ilişkilendirilmiş, özellikle modernist sanat anlayışı içerisinde olumsuz bir kategori olarak değerlendirilmiştir. Modernist estetik içerisinde sanatın özerkliği ve özgünlüğü vurgulanırken, kitsch bu değerlerin karşısında konumlandırılmış ve kolay tüketilebilir, yüzeysel bir estetik üretim biçimi olarak görülmüştür. Bu bağlamda kitsch, çoğu zaman estetik değerden yoksun, taklit ve tekrar üzerinden işleyen bir üretim biçimi olarak değerlendirilmiştir.

Thomas Kulka, kitsch'in üç temel özelliğini duygusallık, kolay tanınabilirlik ve açıklık olarak tanımlar. Buna göre kitsch nesneler, izleyicide düşünsel bir süreç gerektirmeksizin doğrudan duygusal tepki uyandırır; konu hızlı ve zahmetsiz biçimde algılanır ve anlam açık bir şekilde iletilir (Aktaran Carli, 2026, s. 4). Ancak güncel sanat pratiklerinde bu kavramın daha karmaşık ve çok katmanlı bir biçimde ele alındığı görülmektedir. Kitsch, artık dışlanan bir estetik form olmaktan ziyade sanatçılar tarafından bilinçli bir şekilde kullanılan ve dönüştürülen bir ifade aracına dönüşmüştür. Bu nedenle kitsch'i yalnızca estetik bir kategori olarak değil, aynı zamanda günümüz görsel kültürü, tüketim ilişkileri ve temsil biçimleriyle iç içe geçmiş dinamik bir alan olarak ele almak, çağdaş sanatta ortaya çıkan farklı kullanım biçimlerini ve bu kullanımların taşıdığı eleştirel potansiyeli değerlendirmek açısından gereklidir.

Günümüzde görsel kültürün hızla dolaşıma girmesi ve imgelerin sürekli yeniden üretilmesi, kitsch estetiğin farklı biçimlerde ortaya çıkmasını beraberinde getirmektedir. Bu bağlamda kitsch, tekil ve sabit bir anlamdan ziyade, değişken ve bağlamsal bir tercih olarak değerlendirilebilir. Kimi sanatçılar kitsch'i eleştirel ve reflektif bir araç olarak kullanırken, kimi örneklerde bu estetik daha doğrudan ve yüzeysel bir üretim biçimine dönüşmektedir. Bu farklılaşma, kitsch'in güncel sanat içerisindeki konumunu yeniden düşünmeyi gerektirmektedir.

2. KİTSCH KAVRAMININ ORTAYA ÇIKIŞI

Kitsch kavramını anlamak ve günümüzdeki kullanım biçimlerini değerlendirebilmek için, öncelikle ortaya çıktığı dönemin toplumsal, teknolojik ve sanatsal dönüşümlerini dikkate almak gerekmektedir. 19. yüzyıl, endüstrileşme, kentleşme ve teknolojik gelişmelerin hız kazandığı; buna bağlı olarak insanın algı ve deneyim biçimlerinin değişime uğradığı bir dönemdir. Bu süreç, sanatın üretim ve tüketim koşullarını önemli ölçüde dönüştürmüştür. Farklı dillerde kötü beğeniyi ifade eden pek çok terim bulunmasına rağmen, kitsch sanat terminolojisi içinde yerleşmiş ve yaygınlık kazanmış bir terimdir. Calinescu'ya (2017) göre kavram, 1860–1870'lerde Münih'te ucuz sanatsal üretimleri

tanımlamak için kullanılan bir jargona dayanır ve 20. yüzyılın başlarında uluslararası dolaşıma girer (s. 259–260). Kitsch kavramının tarihsel olarak ortaya çıkışı ve yaygınlaşması, onun yalnızca dilsel bir kullanım değil, aynı zamanda estetik ve kültürel tartışmaların merkezinde yer alan bir olgu hâline geldiğini göstermektedir. Bu doğrultuda kavram, modern sanat kuramcıları tarafından farklı bağlamlarda ele alınmış ve özellikle avangard sanat ile kurduğu ilişki üzerinden yeniden tanımlanmıştır.

Greenberg (2015), kitsch'i avangard sanatın karşısında konumlandırarak onu kolay tüketilebilir, yüzeysel ve hazır duygulanımlar sunan bir estetik form olarak tanımlar (s. 44–49). Bu yönüyle izleyiciden düşünsel bir çaba talep etmeyen, doğrudan etki yaratmaya yönelik bir üretim biçimi olarak tanımlanmaktadır. Ayrıca kitsch, yalnızca bir estetik tercih değil, modern kitle kültürünün üretim ve dolaşım mantığıyla iç içe geçmiş bir biçim olarak ortaya çıkar; bu durum, onun “düşük” olarak konumlandırılmasının da yalnızca estetik değil, aynı zamanda kültürel ve toplumsal bir değer yargısına dayandığını gösterir.

Greenberg, avangard ile kitsch arasında keskin ve katı bir karşıtlık kurarken, Eco'ya (1992) göre ise avangard ile kitsch arasındaki ilişki tek yönlü bir karşıtlık değil, karşılıklı bir etkileşimdir. Kitsch, avangardın ürettiği estetik yenilikleri sadeleştirerek geniş kitlelere ulaştırır ve bu süreçte iki alan arasında sürekli bir dönüşüm ilişkisi kurulur (s. 240). Bu çerçevede kitsch, tek başına estetik bir tercih değil, modernleşme sürecinin ürettiği kültürel bir sonuç olarak da değerlendirilebilir. Modernleşmeyle birlikte ortaya çıkan yeni izleyici kitlesi, hızlı tüketilebilen ve kolay alınılabilen estetik biçimlere yönelmiş; bu durum kitsch estetiğin yaygınlaşmasında belirleyici olmuştur.

Kitsch'in sanatla kurduğu ilişki, farklı kuramsal yaklaşımlar doğrultusunda yeniden değerlendirilmiştir. Adorno'ya (2002) göre kitsch, sanatın dışında değil, aksine onun içinde varlığını sürdüren ancak kültür endüstrisi bağlamında sanatın uğradığı yozlaşmayı görünür kılan bir olgudur (s. 239). Ancak Adorno bu durumu olumlayıcı bir biçimde ele almaz; kitsch'i, sanatın kültür endüstrisi içinde uğradığı yozlaşmanın bir göstergesi olarak değerlendirir. Bu anlamda kitsch, sanatın içsel bir parçası olmakla birlikte, onun eleştirel niteliğini yitirdiği noktada belirginleşen bir estetik formdur. Bu yaklaşım, kitsch'i kendi başına estetik bir kategori olarak değil, aynı zamanda sanatın toplumsal koşullarıyla ilişkili bir unsur olarak ele almayı mümkün kılar.

Sanat ile kitsch arasındaki sınırın sabit olmadığını belirten Artun'a (2010) göre belirli bir bağlamda kitsch olarak değerlendirilen bir üretim, başka bir bağlamda sanat olarak kabul edilebilir (s. 1). Bu durum, kitsch ile sanat arasındaki ilişkinin tek yönlü değil, değişken ve geçirgen bir yapı sergilediğini göstermektedir. Bu geçirgenlik, kitsch estetiğinin farklı kullanım biçimlerinin ortaya çıkmasına zemin hazırlamakta ve onun kimi zaman yüzeysel, kimi zaman ise reflektif bir biçimde ele alınabilmesini mümkün kılmaktadır.

Kitsch estetiğin geniş kitleler tarafından benimsenmesinde, imgelerin ve iletilen mesajların izleyicide yarattığı tanıdıklık duygusu belirleyici bir rol oynamaktadır. Benjamin'e (2008) göre kitsch, tanıdıklık ve tekrar üzerinden işleyen bir estetik alana işaret eder. Nesneler izleyiciyle mesafe kurmak yerine doğrudan etki yaratır ve hazır duygulanımlar üretir (s. 236–238). Bu bağlamda kitsch, nesnelerin en tanıdık ve tekrar eden halleriyle kurulan bir ilişki biçimi olarak değerlendirilebilir. Benjamin'in bu yaklaşımı, kitsch'in yalnızca estetik bir kategori olmadığını, aynı zamanda modern insanın nesnelerle kurduğu ilişkiyi de biçimlendirdiğini göstermektedir. Bu doğrultuda kitsch, izleyiciyi düşünmeye

yönlendiren bir deneyim üretmekten çok, tanıdıklık ve hazır duygulanım üzerinden işleyen, gündelik olanı dönüştürmeden izleyiciye tekrar sunan bir estetik alan yaratmaktadır.

3. KITSCH'İN DÖNÜŞÜMÜ

Kitsch kavramının tarihsel olarak ortaya çıkışı ve modernizm bağlamındaki konumlanışı incelendikten sonra, bu estetiğin postmodern dönemde nasıl bir dönüşüm geçirdiğini ele almak gerekmektedir. Modernizm, kategorilere ayrılmış ve görece nesnel bir estetik zemin sunarken, postmodernizm sınırların muğlaklaştığı ve öznel yaklaşımların öne çıktığı daha kaygan bir alan oluşturur. Kitsch, modernist estetik içerisinde dışlanan bir kategori iken, postmodern süreçte yeniden değerlendirmeye açılan bir estetik alan hâline gelmiştir. Bu dönüşüm, sanat alanında da belirgin biçimde hissedilir.

Calinescu'ya (2017) göre postmodernizm, avangardın radikal kopuşlara dayalı yaklaşımını sorgular ve geçmişle kurulan daha yapıcı bir ilişkiyi ön plana çıkarır (s. 303). Modern sanat, kendinden önce gelen gelenekleri aşmayı hedefleyen yenilikçi bir anlayış üzerine kuruluydu. Ancak bu radikal yaklaşım, postmodern düşünceye göre yer yer yıkıcı bir nitelik taşımakta ve sanatı katı kategoriler içine hapsetmektedir. Postmodernizm ise bu keskin ayrımlar yerine daha esnek bir düşünsel ve biçimsel zemin sunar. Bu bağlamda daha önce dışlanan kitsch de yeniden değerlendirilerek, sanatçılar tarafından üzerine düşünülen ve dönüştürülen bir estetik forma dönüşmüştür.

Kitsch'in yaşadığı bu kavramsal dönüşüm, postmodernizm tartışmaları içerisinde kuramsal olarak daha açık biçimde ele alınmaktadır. Bu dönüşüm, Jameson'un (2022) belirttiği gibi, yüksek kültür ile kitle/ticari kültür arasındaki hiyerarşik sınırların çözülmesiyle ilişkilidir. Modernist dönemde dışlanan kültür endüstrisi ürünleri, bu süreçte estetik üretimin bir parçası hâline gelir ve daha önce "aşağı" olarak değerlendirilen kültürel formlar yeni ifade biçimlerine zemin hazırlar (s. 25). Bu gelişmeyle birlikte yüksek ve düşük sanat arasındaki ayrım bulanıklaşmış, kitsch kavramı da yeniden değerlendirmeye açılmıştır. Modernist estetik içerisinde kötü beğenileri çeken bir unsur olarak konumlanan kitsch, postmodern dönemde stratejik bir dönüşüm geçirmiş, sanatçılar tarafından yeniden yorumlanan, bilinçli biçimde kullanılan ve farklı anlam katmanları üretebilen bir ifade aracı hâline gelmiştir. Postmodern yaklaşımın yüksek ve düşük kültür arasındaki sınırları bulanıklaştırması, sanatçıların popüler görsel dil, tüketim kültürü imgeleri ve kitsch olarak tanımlanan estetik unsurları bilinçli biçimde üretimlerine dahil etmelerine olanak tanır. Bu dönüşümün bir sonucu kitsch yalnızca kötü zevkin bir göstergesi olarak değil, sanatçılar tarafından bilinçli biçimde ele alınan ve dönüştürülen bir ifade aracı olarak karşımıza çıkmaktadır. Kitsch, durağan bir yapıdan ziyade farklı derecelere sahiptir ve bağlamsal olarak değişkenlik göstermektedir (Barragán and Ryyänen'den aktaran Carli, 2026, s.1). Bu bağlamda kitsch, yalnızca yüzeysel ya da değersiz bir estetik kategori olarak değil; kimi örneklerde eleştirel, ironik ya da dönüştürücü bir araç olarak yeniden işlev kazanır. Dolayısıyla güncel üretimlerde kitsch'in kullanımı, basit bir tekrarın ötesinde, sanatçının niyetine bağlı olarak farklı anlam katmanları üreten bir strateji olarak değerlendirilebilir. Güncel sanat pratikleri, bu esnek ve çoğulcu alan içerisinde şekillenmekte; postmodernizm, güncelliği tartışmalı olsa da, söz konusu dönüşümü açıklamak açısından hâlâ işlevsel bir çerçeve sunmaktadır.

4. KITSCH'İN GÜNCEL SANATTA ARAÇSALLAŞTIRILMASI- REFLEKTİF KULLANIM İLE YÜZEYSEL ESTETİK ARASINDA

Güncel sanat pratiklerinde kitsch estetiği tekil ve sabit bir biçimde ortaya çıkmamaktadır. Kitsch estetiğin sunduğu parlak yüzeyler, popüler imgeler ve yer yer gülünç ya da ironik nitelik taşıyan nesneler, sanatçıların düşünsel süzgecinden geçerek farklı bir ifade biçimi ortaya koymaktadır. Bazı sanatçılar kitsch estetiğini reflektif bir yaklaşımla ele alarak bilinçli bir üretim aracına dönüştürür. Bu noktada kitsch, yalnızca bir estetik tercih olmaktan çıkar; hem kendisini, hem sanat nesnesini hem de izleyicinin bu ikisine yönelik algısını dönüştüren bir yapıya evrilir ve izleyiciyi düşünmeye davet eder. Diğer taraftan, bazı sanatçıların kitsch estetik unsurları daha doğrudan ve yüzeysel bir biçimde kullandığı görülmektedir. Bu tür örneklerde kitsch, popüler kültür göndermeleri ve görsel cazibe üzerinden işleyen, ancak düşünsel derinliği sınırlı kalan bir üretim biçimi olarak karşımıza çıkar. Bu iki yaklaşım her zaman keskin sınırlarla ayrılmaz; kimi örneklerde bu kullanım biçimlerinin iç içe geçtiği ve birbirine yaklaştığı durumlar da gözlemlenmektedir.

Postmodern sanat bağlamında kitsch'in dönüşümü, parodi ve pastiş kavramlarıyla da ilişkilendirilebilir. Fredric Jameson'ın tanımladığı "pastiche" kavramı, geçmiş estetik biçimlerin eleştirel bir mesafe olmaksızın yeniden üretilmesini ifade eder. Bu bağlamda pastiche, bir tür boş taklit olarak değerlendirilebilir. Parodi ise, belirli bir estetik dili taklit ederken aynı zamanda ona eleştirel bir mesafe koyar (Jameson, 2022, s. 40). Ancak güncel sanat pratiklerinde kitsch'in kullanım biçimleri, bu iki kavram arasında net bir şekilde konumlanmaz. Kimi örneklerde pastiche'e yakın bir tekrar söz konusuyken, kimi durumlarda parodik bir mesafe hissedilir. Bu durum, kitsch'in postmodern bağlamda sabit bir estetik kategori olmaktan çıkarak daha değişken ve çok katmanlı bir yapıya dönüştüğünü göstermektedir. Diğer bir deyişle, reflektif kullanımda parodiye yakın bir mesafe kurulurken, yüzeysel kullanımda pastiche'e yaklaşan bir yeniden üretim söz konusu olabilmektedir. Bu çerçevede, güncel sanat pratiklerinde kitsch'in farklı biçimlerde nasıl araçsallaştırıldığını anlamak için bir zemin sunmaktadır. Postmodern kültür bağlamında kitsch'in bu dönüşümü, yalnızca estetik bir değişim olarak değil, aynı zamanda imgelerin dolaşım biçimleriyle de ilişkilidir. Görsel üretimin hızlandığı ve imgelerin sürekli yeniden üretildiği bir ortamda, kitsch estetik unsurlar da bu dolaşımın bir parçası haline gelir. Bu durum, kitsch'in çağdaş görsel kültürün işleyişine dair bir gösterge olarak ele alınmasını mümkün kılar. Günümüzde kitsch estetiğin sanat ortamında giderek daha görünür ve kabul edilebilir hâle geldiği söylenebilir. Bu estetik, yalnızca geniş kitleler tarafından değil, sanat dünyasının eleştirel çevrelerinde de ilgi görmektedir. Damien Hirst, Jeff Koons ve Takashi Murakami gibi sanatçılar, bir zamanlar küçümsenen kitsch'e özgü biçimsel özellikleri, yani yapay, parıltılı ve gülünç biçimde güzel olarak tanımlanabilecek unsurları, yüksek değerli sanat üretimlerine dönüştürerek kitsch'in sanat piyasasında önemli bir yer edinmesine katkıda bulunmuşlardır (Barragán and Ryyänen'den aktaran Carli, 2026, s. 4). Koons'un seri üretim estetiğini çağrıştıran işleri ve Murakami'nin popüler kültür imgeleriyle kurduğu ilişki, yüksek sanat ile tüketim kültürü arasındaki sınırları bilinçli biçimde bulanıklaştırır. Bu örneklerde kitsch, yalnızca estetik bir tercih değil, aynı zamanda izleyiciyle kurulan ilişkinin biçimini belirleyen stratejik bir araç hâline gelmektedir. Bu çerçevede kitsch, kötü beğenin bir göstergesi olmaktan çıkarak hem eleştirel hem de görsel çekicilik üreten çift yönlü bir işleve sahip olmaktadır. Bu durum, kitsch'in güncel sanat pratiklerinde farklı biçimlerde yeniden üretildiğini gösterirken, yerel örneklerin de bu bağlam içerisinde değerlendirilmesini gerektirmektedir.

5. GÜNÜMÜZ TÜRK SANATINDA KITSCH'İN GÖRÜNÜMLERİ

Son dönem Türk sanatında oldukça popüler olan bazı sanatçıların çalışmalarındaki kitsch estetik unsurlar göze çarpmış ve bunun kullanım amacı değerlendirilmeye değer görülmüştür. Kitsch'i eleştirel ve/veya mizahi bir şekilde ele alıp onu dönüştüren ve yeniden yorumlayan kullanım biçimi postmodernizmin getirdiği düşünsel esnekliğin bir yansımasıdır. Bunun yanında bazı sanatçılar ise bu estetik dili farkındalık geliştirmeksizin yeniden üretmekte ve böylece kitsch'i dönüştürmek yerine yeniden üretmektedir. Çalışmalarında kolay alımlanan bir estetik duruş, çabuk keşfedilen popüler kültür göndermeleri ve parlak ve çekici yüzeyler kullanmaktadırlar.

5.1. REFLEKTİF KITSCH KULLANIMI: ALİ ELMACI

Ali Elmacı'nın üretim pratiği, kitsch estetiğin güncel sanat içerisindeki reflektif kullanımına dair güçlü örnekler sunmaktadır. Sanatçının çalışmalarında sıklıkla karşılaşılan parlak renkler, süsleme yoğunluğu ve popüler kültüre referans veren görsel dil, ilk bakışta kitsch'in doğrudan ve yüzeysel estetik özelliklerini çağırıştırır. Ancak bu estetik tercih, sadece görsel bir cazibe yaratmakla sınırlı kalmaz; aksine izleyiciyi rahatsız eden, çelişkili ve yer yer ironik bir anlatım üzerinden yeniden kurgulanır. Bu yönüyle Elmacı'nın üretimi, kitsch'i olduğu gibi yeniden üretmekten ziyade, onu dönüştüren ve görünür kılan bir strateji olarak değerlendirilebilir. Elmacı'nın çalışmalarında bu reflektif yaklaşım, pastoral ve dekoratif imgeler üzerinden açık biçimde izlenebilir. İlk bakışta huzurlu bir doğa sahnesi, yumuşak renk geçişleri ve naif figürlerle kurulan kompozisyonlar, kitsch estetiğin tanıdık ve güvenli görsel dilini çağırıştırır. Ancak bu yüzeysel uyum, kompozisyona dahil edilen beklenmedik unsurlarla bozulur. Örneğin pastoral bir sahneye yerleştirilen tüfek imgesi ya da romantik bir peyzaj içinde beliren hayalet figürü, izleyicide bir huzursuzluk yaratır ve görüntünün ilk bakışta sunduğu estetik konforu kesintiye uğratar. Bu müdahale, kitsch'in yalnızca kolay alımlanabilir bir estetik üretmekle sınırlı olmadığını, aynı zamanda bu estetiğin içerdiği çelişkileri görünür kılmak üzere de kullanılabileceğini gösterir.





Görsel 1. Ali Elmacı, 2022, Şiddetin Ne Hoş Ne Güzel Şefkatin I,
Tuval Üzerine Yağlı Boya, PLA Üzeri Akrilik, Deri, 92 X 76 Cm

Görsel 2. Ali Elmacı, 2024, Hepimiz Vampiriz Birimiz Hariç III
Tuval Üzerine Yağlı Boya, 203 X 152 Cm

Ali Elmacı'nın üretimlerinde kitsch, yalnızca popüler imgelerin tekrarından ibaret değildir; aksine, abartı, yapaylık ve süsleme üzerinden toplumsal değerler, ahlak anlayışı ve temsil biçimleri üzerine ironik ve eleştirel bir dil kurar. Bu bağlamda Elmacı'nın yaklaşımı, kitsch'i dönüştüren ve ona yeni anlam katmanları ekleyen "reflektif" bir kullanım olarak değerlendirilebilir.

5.2. YÜZEY İLE REFLEKTİF ARASINDA: EMRE YUSUFİ

Emre Yusufi'nin çalışmaları, popüler kültüre ait imgelerin bir araya getirilmesi üzerinden şekillenen bir görsel dil sunmaktadır. Eco'ya (1992) göre kitsch, daha önce tüketilmiş ve aşinalık kazanmış imgelere dayanarak geniş kitlelere kolaylıkla ulaşan ve yaygın kullanımı nedeniyle hızla aşınarak yeniden tüketilebilen estetik nesneleri ifade eder (s. 251). Bu bağlamda, Yusufi'nin üretimlerinde sıkça karşılaşılan tanıdık ve tekrar eden imgeler, kitsch estetiğin tüketim ve yeniden üretim döngüsüyle kurduğu ilişkiyi görünür kılmaktadır. Jameson'un parodi ve pastiş kavramları bu noktada farklı bir bakış açısı sunabilir. Jameson'a (2022) göre pastiş, parodi gibi özgün bir üslubun taklit edilmesine dayanır; ancak parodinin eleştirel ve hicivsel yönlerinden yoksundur (s. 40). Bu bağlamda, Yusufi'nin üretimleri, parodi ile pastiş arasında salınan ve eleştirel mesafenin sınırlarını belirsizleştiren bir görsel dil ortaya koymaktadır.



Görsel 3. Emre Yusufi, 2026 Keith Haring, Mermer Tozu, Reçine, Akrilik, 200x90x60 cm

Sanatçı, klasik heykel geleneğini çağrıştıran figürleri popüler imgelerle bir araya getiren bir üretim pratiği izlemektedir. Keith Haring'e referans veren bu çalışmada, klasik formdaki heykel üzerine Haring'in karakteristik çizgisel dili yerleştirilmiş; böylece yüksek sanat ile popüler görsel kültür arasındaki sınırların nasıl iç içe geçtiği görünür kılınmıştır. İlk bakışta dekoratif ve yüzeysel bir müdahale izlenimi veren bu yaklaşım, kitsch estetiğin sunduğu tekrar, tanıdıklık ve görsel çekicilik unsurlarını açıkça taşımaktadır. Ancak Haring'in grafiti kökenli, kamusal alana ait ve kolay okunabilir görsel dili, bu yüzeysel etkiyi aşan farklı bir okuma imkânı da sunar. Bu müdahale, klasik sanat nesnesini yalnızca biçimsel olarak dönüştürmekle kalmaz; aynı zamanda yüksek sanatın otoritesini popüler imgeler aracılığıyla yeniden tartışmaya açar. Bununla birlikte, bu yaklaşımın izleyicide derinlikli bir eleştirel mesafe üretip üretmediği, yoksa daha çok görsel çekicilik üzerinden işleyen bir etkiyle mi sınırlı kaldığı sorusu açık kalmaktadır. Bu yönüyle çalışma, reflektif kullanım ile yüzeysel estetik arasında konumlanan bir ara alanı işaret etmektedir.

5.3. TEKRAR, ÖYKÜNME VE KİTSCH

Sertap Yeğin'in üretim pratiği, özgünlük fikrine mesafeli yaklaşımı ve tekrar eden görsel dil üzerinden şekillenmektedir. Dünyaca ünlü kitsch ressam Odd Nerdrum'un atölyesinde çalışma imkânı bulan sanatçı, çalışmalarında Rönesans ve Barok sanatın ışık-gölge kullanımını referans almakta, figürlerini bağlamsız bir tipoloji içinde ele almaktadır. Gündelik gerçeklikten uzak, zamansız ve mekânsız bir düzlemde kurulan bu kompozisyonlarda Odd Nerdrum'un etkisi belirgin biçimde hissedilmektedir. Nerdrum için kitsch, modernitenin dışladığı duygusal anlatımı yeniden sahiplenilen bir tutumdur. Sanatçı, kitsch'i insani ve duygusal olanın yeniden ifadesi olarak konumlandırır (Nerdrum'dan aktaran İkizoğlu, 2025, s.88). Klasik tekniklerle resmedilen figürler çoğu zaman korunaksız, yersiz ve kırılğan bir varoluş hâli içindedir ve resme norm dışı, garip ve rahatsız edici unsurlar eşlik eder. Yeğin'in çalışmalarında ise bu yaklaşımın daha steril ve kontrollü bir estetik dil içerisinde yeniden üretildiği görülmektedir.



Görsel 4. Sertap Yeğin, 2024, Anı Kazıları - 4, Tuval üzeri yağlı boya, 180x200 cm

Yeğin ile yapılan bir söyleşide sanatçının, özgünlüğün tartışılması gereken bir mesele olmadığını; sanat eğitimi alan bireylerin öncüllerle tanışmadan ve zaman zaman onlara öykünmeden üretim sürecini

sürdüremeyeceklerini ifade ettiği görülür (Yüksel, 2025). Bu yaklaşım, özgünlük fikrinin geri plana itildiği ve tekrarın meşrulaştırıldığı bir üretim anlayışına işaret eder. Bu noktada Yeğin'in pratiği, kitsch estetiğin yeniden üretim ve tanıdıklık üzerinden işleyen yapısıyla kesişmekte; ancak bu kesişim, eleştirel bir mesafe üretip üretmediği sorusunu da beraberinde getirmektedir. Bu durum, Yeğin'in pratiğini kitsch estetiğin yeniden üretim boyutuyla ilişkilendirirken, eleştirel mesafenin sınırlarını da tartışmaya açar.

5.4. KITSCH VE KAMUSAL DENEYİM

Düz Koşu adlı çalışma, büyük ölçeği ve kamusal alanda konumlandırılmasıyla dikkat çeken bir enstalasyondur. Yaklaşık 10 metre yüksekliğindeki eser, yumuşak dokusu ve oyuncak estetiğini çağrıştıran formuyla izleyiciye ilk bakışta kolay alımlanabilir bir görsel deneyim sunar. Sanatçı bu çalışmasını, “koşullanmış ve dayatılmışın dışına çıkamadan sürdürdüğümüz koşma halı” ve kentin temposuna kapılmanın yarattığı “donma hissi” üzerinden açıklamaktadır. Bu yönüyle eser, kamusal alanda rastlantısal karşılaşmalara açık bir biçimde konumlanarak izleyici ile doğrudan bir ilişki kurar. Bu bağlamda çalışmada kitsch estetik unsurların kullanımına bakıldığında, parlak renkler, abartılı ölçek ve oyuncak benzeri formun, kitsch'in kolay alımlanan ve doğrudan görsel cazibeye dayanan dilini çağrıştırdığı görülür. Umberto Eco'nun kitsch'e ilişkin değerlendirmeleri, bu estetiğin yüzeysel etkiler üzerinden işleyen ve hızlı alımlanabilirlik üreten yapısına işaret eder. Eco'ya göre kitsch, etkiler üzerinden işleyerek deneyimin yüzeyini kullanan ve bu yolla kendisini meşrulaştıran bir estetik üretim biçimidir. (Eco, 2009, s. 404). Ancak bu görsel cazibe, eserin kamusal mekânda yarattığı yabancılaştırıcı etki ve sanatçının işaret ettiği kavramsal çerçeve ile birlikte düşünüldüğünde, yüzeysel bir estetik deneyimin ötesine geçer. Bu durum, kitsch'in yalnızca basit bir görsel çekicilik aracı olarak değil, aynı zamanda eleştirel bir ifade biçimi olarak da araçsallaştırılabileceğini göstermektedir. Bu yaklaşım, sanatçının diğer çalışmalarında da benzer biçimde sürdürülen bir strateji olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu yönüyle çalışma, kitsch estetiğin kamusal alandaki potansiyelini görünür kılan bir örnek olarak değerlendirilebilir.



Görsel 5. Uğur Acil, 2026, Düz Koşu

6. SONUÇ

Bu çalışma kapsamında, kitsch kavramının ortaya çıkışı, modernist estetik içerisindeki konumlanması ve postmodern dönemde geçirdiği dönüşüm ele alınmıştır. Kitsch'in tarihsel süreç içerisindeki anlam değişimleri, farklı kuramsal yaklaşımlar doğrultusunda değerlendirilmiş ve kavramın

sanat ile kurduğu ilişkinin sabit bir yapı sergilemediği ortaya konulmuştur. Modern sanat teorisyenleri kitsch'i yüksek sanatın karşısında konumlandırmış ve onu basit taklit ile kolay duygulanımlar üzerinden işleyen bir ifade biçimi olarak değerlendirmiştir. Bununla birlikte postmodernizm, bu keskin sınırları bulanıklaştırarak kitsch'in yeniden yorumlanmasına olanak tanımış; kavramı estetik bir unsur olmanın ötesine taşıyarak stratejik bir ifade aracına dönüştürmüştür.

İncelenen örnekler, kitsch estetiğin güncel Türk sanatında tekil ve sabit bir biçimde ortaya çıkmadığını göstermektedir. Kitsch'in güncel sanat içerisindeki kullanımı sabit bir değer yargısı üzerinden değil, üretim biçimleri ve sanatçı niyetleri doğrultusunda değerlendirilmelidir. Kimi sanatçılar kitsch'i eleştirel ve reflektif bir araç olarak kullanırken, kimi örneklerde bu estetik daha yüzeysel ve tekrar odaklı bir üretim biçimine dönüşmektedir. İncelenen örnekler üzerinden değerlendirildiğinde, Ali Elmacı'nın kitsch estetiği eleştirel ve dönüştürücü bir strateji olarak kullandığı; Emre Yusufi'nin üretimlerinde bu estetiğin parodi ile pastiş arasında salınan daha belirsiz bir yapı sergilediği görülmektedir. Sertap Yeğin'in pratiği ise tekrar ve öykünme üzerinden şekillenen, reflektif kullanım ile yüzeysel estetik arasında konumlanan bir ara alan sunmaktadır. Uğur Acil'in çalışmaları ise kitsch estetiğin eleştirel bir dille araçsallaştırılarak kamusal alanda izleyici ile doğrudan iletişim kurmanın bir yolu olabileceğini göstermektedir. Bu farklı kullanım biçimleri, kitsch'in güncel sanat içerisindeki işlevinin sanatçının niyeti ve üretim stratejisine bağlı olarak değişkenlik gösterdiğini ortaya koymaktadır. Aynı zamanda kitsch, günümüzde yalnızca kötü zevkin bir göstergesi olarak değil, çok katmanlı ve değişken bir estetik alan olarak ele alınmalıdır. Bu bağlamda kitsch, güncel sanat içerisinde yalnızca estetik bir kategori değil, aynı zamanda sanatçının izleyiciyle kurduğu ilişkinin niteliğini belirleyen bir strateji olarak değerlendirilebilir.

KAYNAKÇA

- Adorno, T. W. (2002). *Aesthetic Theory* (G. Adorno & R. Tiedemann, Eds.). Continuum.
- Artun, A. (2010). *Kitsch, Pop Ve Eleştirinin Anlamsızlaşması*. <https://aliartun.com/yazilar/kitsch-pop-ve-elestirinin-anlamsizlasmasi>
- Benjamin, W. (2008). "Dream Kitsch Gloss on Surrealism". M. W. Jennings, B. Doherty ve T. Y. Levin (Ed.), *The Work of Art in The Age of Its Technological Reproducibility, and Other Writings on Media* içinde (s. 236-239). Harvard University Press.
- Calinescu, M. (2017). *Modernliğin Beş Yüzü, Modernizm, Avangard, Dekadans, Kitsch, Postmodernizm* (Çev. Gürses, S.). Küre Yayınları.
- Carli, R. (2026). *Living with the Everyday Kitsch Object: A New Existential Potentiality*. British Journal of Aesthetics 66- s.1-16. <https://doi.org/10.1093/aesthj/ayaf005>
- Eco, U. (1992). *Açık Yapıt*. (Çev. Y. Şahan,). Kabalcı Yayınevi.

- Eco, U. (2009). *Çirkinliğin Tarihi* (Çev., A. U. Ergün, Ö. Çelik, A. Uysal, E. N. Arbaş, M. Barsbey, K. K. Akkulbut, D. Arslan & B. Yılmazcan,). Doğan Kitap.
- Greenberg, C. (2015). Avangart Ve Kitsch. (Çev. M. Yalçın,). *Melamet Dergisi*, 1, 44-49.
- İkizoğlu, S. (2025). Odd Nerdrum'da Kitsch Kavramı Bağlamında Sanatın İnsansızlaşması. *yedi: Sanat, Tasarım ve Bilim Dergisi*, 33, 87-99. doi: 10.17484/yedi.1552695
- Jameson, F. (2022). *Postmodernizm ya da Geç Kapitalizmin Kültürel Mantığı*. (Çev. C. Gönenç). Alfa Yayınları.
- Bülent Yüksel / Resim Heykel Kanalı (2025). *Sertap Yeğin: "Özgünüm" Diyenin Bilgisinden Şüphe Ederim*. [Video]. YouTube <https://www.youtube.com/watch?v=DVFGqkLeWWI>

GÖRSEL KAYNAKÇASI

- <https://www.pilevneli.com/tr/exhibitions/68/works/artworks-11287-ali-elmaci-siddetin-ne-hos-ne-guzel-sefkatin-i-2022/>
- <https://www.pilevneli.com/artworks/12269-ali-elmaci-hepimiz-vampiriz-birimiz-haric-iii-2024/>
- <https://www.galerisoyut.com.tr/sanatcilar/36/sertap-yegin#32730>
- <https://www.gastronomidergisi.com/haber/kamusal-alanda-zamani-durdurmak>
- <https://www.miartgallery.com/artists/126-emre-yusufi/works/9967-emre-yusufi-keith-haring/>

Beden Eğitimi Öğretmen Adayları İle Diğer Branş Öğretmen Adaylarının Akademik Motivasyon Ve Motivasyonel Çalışma Koşullarının İncelenmesi

Reyhan Alaçam¹, Kevser Ceren Coşkun² İlknur Yazıcılar Özçelik³

¹E-mail: reyhanalacam0005@gmail.com; Amasya Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Beden Eğitimi ve Spor Anabilim Dalı, Amasya/ Türkiye. – ORCID: 0009-0001-8697-891

²E-mail: kccosgun@icloud.com; Amasya Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Beden Eğitimi ve Spor Anabilim Dalı, Amasya/ Türkiye

³E-mail: ilknur.yazicilar@amasya.edu.tr; Amasya Üniversitesi, Eğitim Fakültesi, Beden Eğitimi ve Spor Bölümü, Amasya/ Türkiye. - ORCID: 0000-0002-3259-7820

Özet

Bu çalışmanın amacı beden eğitimi öğretmen adayları ile diğer branş öğretmen adaylarının akademik motivasyon ve motivasyonel çalışma koşullarının incelenmesidir. Bu amaç doğrultusunda öğrencilerin akademik motivasyon ve motivasyonel çalışma koşulları cinsiyet, bölüm ve sınıf değişkenleri dikkate alınarak incelenmiştir. Çalışmaya 357'i kız, 151'i erkek olmak üzere toplam 508 ($X_{yaş}=21,65\pm2,85$) öğrenci katılmıştır. Çalışmada verileri elde etmek amacıyla kişisel bilgi formu, Akademik Motivasyon Ölçeği (AMÖ) ve Motivasyonel Çalışma Koşulları Ölçeği (MÇKÖ) kullanılmıştır. Verileri değerlendirmek için tanımlayıcı analizler, bağımsız örneklem t-testi, tek yönlü varyans analizi ve farklılıkların kaynağını belirlemek amacıyla LSD Post. Hoc. analizi kullanılmıştır.

İstatistiksel analiz sonuçlarına göre, öğrencilerin bölümleri, cinsiyetleri ve sınıfları ile MÇKÖ alt boyutları arasında anlamlı bir fark vardır ($p<0,01$; $p<0,05$). Öğrencilerin akademik motivasyon düzeyleri ile cinsiyet, bölüm ve sınıf değişkenleri arasında ise anlamlı bir fark bulunmamıştır.

Sonuç olarak, Beden eğitimi öğrencilerinin MÇKÖ alt boyutlarından yeterlik desteği boyutu puan ortalaması diğer bölümlerden yüksek, aşırı iş yükü boyutu ise diğer bölümlerden düşüktür.

Anahtar Kelimeler: Akademik motivasyon, Beden eğitimi, Öğrenci

Abstract

The aim of this study is to examine the academic motivation and motivational work conditions of physical education teacher candidates and teacher candidates in other subjects. The purpose of this research is to examine coaches' self-efficacy and communication skills according to various demographic characteristics and to determine whether there is a relationship between these two concepts. To this end, students' academic motivation and motivational study conditions were examined, taking into account the variables of gender, department, and grade level. A total of 508 students ($X_{age} = 21.65 \pm 2.85$), including 357 females and 151 males, participated in the study. To collect data for this study, a personal information form, the Academic Motivation Scale (AMS), and the Motivational Study Conditions Scale (MSCS) were used. To analyze the data, descriptive statistics, an independent samples t-test, a one-way analysis of variance (ANOVA), and an LSD post-hoc test were used to identify the sources of differences.

According to the results of the statistical analysis, there is a significant difference between students' departments, genders, and grade levels and the subdimensions of the MSCS. However, no significant difference was found between students' academic motivation levels and the variables of gender, department, and grade level. In conclusion, physical education students have a higher average score on the "support for competence" subscale of the MSCS than students in other departments, while their score on the "excessive workload" subscale is lower than that of students in other departments.

Keywords: Academic motivation, Physical education, Student

GİRİŞ

Motivasyon, bireyin belirli bir hedefe ulaşmak amacıyla davranışlarını başlatan, yönlendiren ve sürdüren içsel ve dışsal süreçlerin bütünü olarak tanımlanmaktadır. Eğitim ortamlarında motivasyon, öğrencilerin öğrenmeye yönelik isteklerini, derse katılım düzeylerini, akademik başarılarını ve öğrenme sürecindeki devamlılıklarını etkileyen temel değişkenlerden biridir. Özellikle öğretmen adaylarının akademik motivasyon düzeyleri hem kendi öğrenme süreçlerinin niteliğini hem de gelecekte öğrencilerine sağlayacakları öğrenme ortamlarının kalitesini doğrudan etkileyebilecek önemli bir unsurdur (Deci ve Ryan, 2000; Karagüven, 2012). Akademik motivasyon, öğrencilerin öğrenmeye yönelik ilgilerini, çabalarını ve akademik görevleri sürdürme isteklerini ifade etmektedir. Yüksek akademik motivasyona sahip bireylerin öğrenme süreçlerine daha etkin katıldıkları, zorluklar karşısında daha dirençli oldukları ve akademik başarılarının daha yüksek olduğu belirtilmektedir (Vallerand , Pelletier, Blais, Senecal ve diğerleri, 1992). Buna karşılık motivasyon düzeyi düşük olan öğrencilerde derslere karşı ilgisizlik, başarısızlık ve öğrenme sürecinden uzaklaşma gibi olumsuz durumlar daha sık görülmektedir. Öğrencilerin akademik motivasyonları yalnızca bireysel özelliklerinden değil, aynı zamanda içinde bulundukları öğrenme ortamının sunduğu koşullardan da etkilenmektedir. Öğretim elemanlarının öğrencilere sağladığı yeterlik desteği, özerklik desteği, sosyal etkileşim fırsatları, öğretim kalitesi, içerik uygunluğu ve öğretim elemanlarının derse yönelik ilgisi gibi faktörler öğrencilerin motivasyon düzeylerinin şekillenmesinde önemli rol oynamaktadır (Kaupper, Sobieraj, Fabian, Gläser-Zikuda, 2012; Uslu, 2021). Bu nedenle motivasyonel çalışma koşullarının incelenmesi, öğrencilerin öğrenme süreçlerini destekleyen ya da olumsuz etkileyen çevresel etmenlerin belirlenmesi açısından önem taşımaktadır. Öğretmen adayları, gelecekte eğitim sisteminin temel uygulayıcıları olacakları için bu grubun akademik motivasyon düzeylerinin ve motivasyonel çalışma koşullarına ilişkin algılarının belirlenmesi oldukça önemlidir. Öğretmen adaylarının yüksek motivasyona sahip olmaları; mesleki yeterliklerini geliştirmelerine, öğretmenlik mesleğine olumlu tutum kazanmalarına ve etkili öğretim becerileri geliştirmelerine katkı sağlayacaktır. Ayrıca farklı bölümlerde öğrenim gören öğretmen adaylarının motivasyon düzeyleri ile öğrenme ortamına ilişkin algılarının değişip değişmediğinin ortaya konulması, öğretmen yetiştirme programlarının geliştirilmesi açısından önemli bilgiler sunacaktır. Alanyazın incelendiğinde akademik motivasyon ile çeşitli bireysel ve çevresel değişkenler arasındaki ilişkileri inceleyen birçok araştırma bulunmakla birlikte, öğretmen adaylarının akademik motivasyonları ile motivasyonel çalışma koşullarını birlikte ele alan çalışmaların sınırlı olduğu görülmektedir. Özellikle farklı öğretmenlik programlarında öğrenim gören öğrencilerin bu değişkenler açısından karşılaştırılması, öğretmen yetiştirme sürecine yönelik önemli çıkarımlar sağlayabilir. Bu bağlamda araştırmanın amacı, Amasya Üniversitesi Eğitim Fakültesinde öğrenim gören öğretmen adaylarının akademik motivasyon düzeyleri ile motivasyonel çalışma koşullarına ilişkin algılarını incelemek ve bu değişkenlerin cinsiyet, bölüm ve sınıf düzeyi açısından farklılaşıp farklılaşmadığını belirlemektir. Elde edilen bulguların, öğretmen yetiştirme programlarının niteliğinin artırılmasına ve öğrencilerin motivasyonlarını destekleyici eğitim ortamlarının geliştirilmesine katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

YÖNTEM

Bu çalışmada, nicel araştırma yöntemlerinden betimsel tarama modeli kullanılmıştır.

Evren ve Örneklem

Çalışmanın evrenini, 2025-2026 öğretim yılında Amasya Üniversitesi Eğitim Fakültesinde Okul Öncesi, Psikolojik Danışma ve Rehberlik, Fen Bilgisi, İngilizce Sosyal Bilgiler, Türkçe, Beden Eğitimi ve Spor Öğretmenliği bölümlerinde öğrenim gören öğrenciler oluşturmaktadır. Çalışmaya gönüllü katılmayı kabul eden 357'i kız, 151'i erkek olmak üzere toplam 508 ($X_{\text{yaş}}=21,65\pm2,85$) öğrenci çalışmanın örneklemi oluşturmaktadır. Çalışmanın örneklemini belirtilen evren içerisinde uygun örnekleme yöntemiyle seçilmiştir. Olasılıksız örnekleme tekniklerinden olan elverişlilik ya da uygun örneklem, evrendeki ulaşılabilirliği kolay durumu seçmek için kullanır, zaman ve maliyet açısından daha ekonomiktir (Kılıç, 2013).

Katılımcıların Demografik Özelliklerine Ait Tanımlayıcı İstatistikler

Cinsiyet	f	%	Bölüm	f	%
Kadın	357	70,3	Okul Öncesi Öğretmenliği (OÖÖ)	82	16,1
Erkek	151	29,7	Psikolojik Danışma ve Rehberlik (PDR)	81	15,9
Toplam	508	100	Fen Bilgisi Öğretmenliği (FBÖ)	59	11,6
Yaş	f	%	İngilizce Öğretmenliği (İÖ)	90	17,7
18-20 yaş	178	35,0	Sosyal Bilgiler Öğretmenliği (SBÖ)	71	14,0
21-23 yaş	251	49,4	Türkçe Öğretmenliği (TÖ)	59	11,6
24 ve üzeri	79	15,6	Beden Eğitimi ve Spor Öğretmenliği (BESÖ)	66	13,0
Toplam	508	100	Toplam	508	100
Sınıf	f	%			
1.sınıf	122	24,0			
2.sınıf	127	25,0			
3.sınıf	132	26,0			
4.sınıf	127	25,0			
Toplam	508	100			

Tablo 1'de örnekleme dâhil edilen öğrencilerin demografik özelliklerine ilişkin tanımlayıcı istatistikler yer almaktadır. Buna göre katılımcıların %70,3'ü (n=357) kadın, %29,7'si (n=151) erkek öğrencilerden oluşmaktadır. Yaş dağılımı incelendiğinde, öğrencilerin %35,0'ının 18–20 yaş, %49,4'ünün 21–23 yaş ve %15,6'sının 24 yaş ve üzeri olduğu görülmektedir. Bu bulgu, örneklemin büyük çoğunluğunun 21–23 yaş aralığında yoğunlaştığını göstermektedir.

Katılımcıların öğrenim gördükleri bölümlere göre dağılımı incelendiğinde; İngilizce Öğretmenliği (%17,7) ve Okul Öncesi Öğretmenliği (%16,1) bölümlerinin en yüksek orana sahip olduğu, bunu PDR (%15,9) ve Sosyal Bilgiler Öğretmenliği (%14,0) bölümlerinin izlediği görülmektedir. Fen Bilgisi Öğretmenliği ve Türkçe Öğretmenliği bölümleri örneklemin %11,6'sını, Beden Eğitimi ve Spor Öğretmenliği bölümü ise %13,0'ını oluşturmaktadır. Bu dağılım, örneklemin fakülte bünyesindeki bölümleri dengeli bir biçimde temsil ettiğini göstermektedir. Sınıf düzeyine göre dağılım incelendiğinde, katılımcıların %24,0'ının 1. sınıf, %25,0'ının 2. sınıf, %26,0'ının 3. sınıf ve %25,0'ının 4. sınıf öğrencisi olduğu görülmektedir. Bu sonuç, örneklemin sınıf düzeyleri açısından homojen bir dağılım sergilediğini ortaya koymaktadır.

Veri Toplama Araçları

Çalışmada kullanılan veri toplama aracı üç bölümden oluşmaktadır. İlk bölümde yer alan “Kişisel Bilgi Formu” içeriğinde demografik faktörleri oluşturmak için cinsiyet, yaş bölüm türü ve sınıf düzeyi durumunu kapsayan bağımsız değişkenlerle ilgili sorular yer almaktadır. İkinci bölümde, Akademik Motivasyon Ölçeği (AMÖ) ve üçüncü bölümde Motivasyonel Çalışma Koşulları Ölçeği (MÇKÖ) yer almaktadır.

Akademik Motivasyon Ölçeği (AMÖ)

Araştırmanın verilerinin toplanmasında Karagüven (2012) tarafından geliştirilen yedili Likert tipindeki “Akademik Motivasyon Ölçeği (AMÖ)” kullanılmıştır. 28 maddeden oluşan ölçek, her biri dört maddeden oluşan yedi alt boyut içermektedir. Bilmeye yönelik içsel motivasyon (İMBİ), başarmaya yönelik içsel motivasyon (İMBA), uyarım yaşamaya yönelik içsel motivasyon (İMH), belirlenmiş dışsal motivasyon (DMT), içe yansıyan dışsal motivasyon (DMKİ), dışsal motivasyon-dış düzenleme (DMD) ve motivasyonsuzluk (MS) olarak belirlenmiştir. Ölçeğin boyutlarına ilişkin derecelendirme “hiç uyuşmuyor, biraz uyuşuyor, orta derecede uyuşuyor, oldukça uyuşuyor, tam olarak uyuşuyor” biçiminde düzenlenmiştir. Alt boyutlardan alınan puanlar en düşük 4 en yüksek 28’dir. Ölçek puanlaması alt boyutlardan elde edilebileceği gibi genel toplam puan hesaplanarak da yapılabilir. Bu çalışmada toplam puan kullanılmıştır.

Motivasyonel Çalışma Koşulları Ölçeği (MÇKÖ)

Motivasyonel Çalışma Koşulları Ölçeği Kauper ve diğerleri (2012) tarafından geliştirilmiştir. Ölçeğin Türkçe uyarlaması Uslu (2021) tarafından yapılmış olup çeviri tekrar çeviri çalışmaları sonrası öğretmen adaylarından veri toplanmıştır. Açıklayıcı faktör analizi sonucunda toplam varyansın %78’ini açıklayan orijinal yapı Türkçe form için de korunmuştur. Madde faktör yükleri .41 ile .87 arasında değişmektedir. Türkçe forma ilişkin Cronbach alpha güvenirlik değerleri .76 ile .92 arasında bulunmuştur. Aynı değerler bu çalışmada .62 ile .83 arasında hesaplanmıştır.

Verilerin Analizi

Araştırmaya 513 öğrenci katılmıştır. Analiz yapılmadan önce verilerin doğruluğu, kayıp değerler olup olmadığı konusunda yapılan inceleme sonrasında hatalılar elenmiş, 508 öğrenci çalışmaya dahil edilmiştir. Verilerin normallik, homojenlik, çarpıklık (kurtosis) ve basıklık (skewness) değerleri analiz edilmiş ve bunun sonucunda verilerin normal dağılıma sahip olduğu görülmüştür. Verileri değerlendirilmek için tanımlayıcı analizler, iki bağımsız değişkenin olduğu gruplarda bağımsız örneklem t-testi, bağımsız grupların sayısının daha fazla olduğu gruplarda tek yönlü varyans analizi (ANOVA) ve farklılıkların kaynağını belirlemek amacıyla LSD Post Hoc analizi kullanılmıştır. Araştırmada anlamlılık düzeyi $p < 0,05$ olarak kabul edilmiştir.

Tablo 2. Ölçme Araçlarına Ait Puanların Tanımlayıcı İstatistikleri, Normallik ve Güvenirlik Analizi Sonuçları

	Ölçme Aracı	n	Min-Max	Ort.	Sd.	Skewness	Kurtosis	Cronbach's Alpha
	Akademik Motivasyon (AMÖ)	508	69-190	132,21	21,79	-0,432	-0,022	0,86
MÇK	Sosyal Etkileşim (MÇK-SE)	508	3-12	8,64	1,888	-0,297	0,092	0,66
	Yeterlik Desteği (MÇK-YD)	508	3-12	8,62	1,980	-0,186	-0,054	0,77
	Özerklik Desteği (MÇK-ÖD)	508	3-12	9,51	1,819	-0,631	0,849	0,77
	Öğretim Elemanı-Öğrenci İlişkisi (MÇK-ÖEÖİ)	508	3-12	9,12	2,068	-0,446	0,130	0,83
	İçeriğin Uygunluğu (MÇK-İU)	508	3-12	9,40	1,862	-0,454	0,198	0,75
	Öğretim Kalitesi (MÇK-ÖK)	508	3-12	12,05	2,678	-0,364	-0,115	0,84
	Öğretim Elemanın Konuya İlgisi (MÇK-ÖEKİ)	508	3-12	8,78	2,090	-0,430	-0,031	0,79
	Aşırı İş Yükü/ Zorluk (MÇK-AİY)	508	3-12	7,34	2,487	0,043	-0,602	0,85

Tablo 2 değerlendirildiğinde, ölçme araçlarına ait tüm verilerin normal dağılım gösterdiği tespit edilmiştir. Basıklık-çarpıklık değerlerinin $\pm 1,5$ değer aralığında olması normal dağılım olarak kabul edilmektedir (Tabachnick ve Fidell, 2013).

BULGULAR

Tablo3. Öğrencilerin Bölümleri ile Akademik Motivasyon ve Motivasyonel Çalışma Koşulları Düzeylerine Ait Tek Yönlü Varyans Analizi Sonuçları

Ölçme aracı	Bölüm	n	Ort.	Varyans Kaynağı	Kareler Toplamı	Sd.	Kareler Ortalaması	F	P
AMÖ	OÖÖ	82	132,09	Gruplar arası	3704,381	6	617,397	1,304	0,254
	PDR	81	133,49						
	FBÖ	59	136,81						
	İÖ	90	127,42						
	SBÖ	71	132,95	Gruplar içi	237205,231	501	473,464		
	TÖ	59	130,93						
	BESÖ	66	133,56						
	Toplam	508	132,21	Toplam	240909,612	507			
MÇK-SE	OÖÖ	82	8,52	Gruplar arası	44,202	6	7,367	2,093	0,053
	PDR	81	8,97						

	FBÖ	59	8,91						
	İÖ	90	8,83						
	SBÖ	71	8,32	Gruplar içi					
	TÖ	59	8,08		1763,725	501		3,520	
	BESÖ	66	8,75						
	Toplam	508	8,64	Toplam	1807,927	507			
MÇK-YD	OÖÖ	82	8,34						
	PDR	81	8,98	Gruplar arası	57,227	6		9,538	
	FBÖ	59	8,86						
	İÖ	90	8,60						
	SBÖ	71	8,43	Gruplar içi				2,473	0,023*
	TÖ	59	8,03		1931,960	501		3,856	
	BESÖ	66	9,07						
	Toplam	508	8,62	Toplam	1989,187	507			
MÇK-ÖD	OÖÖ	82	9,50						
	PDR	81	9,64	Gruplar arası	17,148	6		2,858	
	FBÖ	59	9,13						
	İÖ	90	9,58						
	SBÖ	71	9,69	Gruplar içi				0,862	0,523
	TÖ	59	9,66		1661,755	501		3,317	
	BESÖ	66	9,28						
	Toplam	508	9,51	Toplam	1678,904	507			
MÇK-ÖEÖİ	OÖÖ	82	8,96						
	PDR	81	9,23	Gruplar arası	72,025	6		12,004	
	FBÖ	59	9,67						
	İÖ	90	9,54					2,869	0,009**
	SBÖ	71	8,46	Gruplar içi					
	TÖ	59	8,88		2096,408	501		4,184	

	BESÖ	66	9,03						
	Toplam	508	9,12	Toplam	2168,433	507			
MÇK-İU	OÖÖ	82	9,60						
	PDR	81	9,80	Gruplar arası	52,586	6	8,764		
	FBÖ	59	8,66						
	İÖ	90	9,46						
	SBÖ	71	9,39	Gruplar içi	1705,492	501	3,404	2,575	0,018*
	TÖ	59	9,16						
	BESÖ	66	9,43						
	Toplam	508	9,40	Toplam	1758,079	507			
MÇK-ÖK	OÖÖ	82	12,19						
	PDR	81	12,64	Gruplar arası	77,300	6	12,883		
	FBÖ	59	11,44						
	İÖ	90	12,32						
	SBÖ	71	11,61	Gruplar içi	3559,370	501	7,105	1,813	0,095
	TÖ	59	11,74						
	BESÖ	66	12,06						
	Toplam	508	12,05	Toplam	3636,669	507			

Tablo3. Öğrencilerin Bölümleri ile Akademik Motivasyon ve Motivasyonel Çalışma Koşulları Düzeylerine Ait Tek Yönlü Varyans Analizi Sonuçları(devamı)

Ölçme aracı	Bölüm	n	Ort.	Varyans Kaynağı	Kareler Toplamı	Sd.	Kareler Ortalaması	F	P
MÇK-ÖEKİ	OÖÖ	82	8,68						
	PDR	81	9,41	Gruplar arası	67,124	6	11,187	2,610	0,017*
	FBÖ	59	8,37						
	İÖ	90	8,97						
	SBÖ	71	8,49	Gruplar içi	2147,622	501	4,287		
	TÖ	59	8,32						
	BESÖ	66	8,93						
	Toplam	508	8,78	Toplam	2214,746	507			
MÇK-AİY	OÖÖ	82	7,47						
	PDR	81	6,88	Gruplar arası	86,886	6	14,481	2,379	0,028*
	FBÖ	59	7,32						
	İÖ	90	7,64						
	SBÖ	71	7,54	Gruplar içi	3050,137	501	6,088		
	TÖ	59	7,94						
	BESÖ	66	6,60						
	Toplam	508	7,34	Toplam	3137,024	507			

*p<0,05; **p<0,01

MÇK-YD Fark: TÖ <PDR, FBÖ ve BESÖ; BES> OÖÖ ve TÖ; OÖÖ<PDR ve BESÖ; **MÇK-ÖEÖİ Fark:** SBÖ<PDR, FÖ ve İÖ; FBÖ>OÖÖ, SBÖ ve TÖ; **MÇK-İU Fark:** FBÖ<OÖÖ, PDR, İÖ, SBÖ ve BESÖ; PDR>FBÖ ve TÖ; **MÇK-ÖEKİ Fark:** PDR>OÖÖ, FBÖ, SBÖ ve TÖ; **MÇK-AİY Fark:** BES<OÖÖ, İÖ, SBÖ ve TÖ; PDR<İÖ ve TÖ

Tablo 3'teki tek yönlü varyans analizi sonuçlarına göre, araştırmaya katılan öğrencilerin bölümleri ile motivasyonel çalışma koşulları alt boyutlarından yeterlik desteği, öğretim elemanı öğrenci ilişkisi, içerik uygunluğu, öğretim elemanının konuya ilgisi ve aşırı iş yükü puan ortalamaları arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark olduğu görülmektedir ($F_{(6,1179)} = 2,473$; $F_{(6, 2096,408)} = 2,869$; $F_{(6, 1705,492)} = 2,575$; $F_{(6, 2147,622)} = 2,610$; $F_{(6, 3050,137)} = 2,379$; $p < 0,01$ - $p < 0,05$).

Bu sonuçlara göre *yeterlik desteği* puan ortalamalarında en yüksek ortalama Beden Eğitimi ve

Spor Öğretmenliği bölümünde görülürken en düşük puan ortalaması Türkçe Öğretmenliği bölümündedir. *Öğretim elemanı öğrenci ilişkisi boyutunda*, en yüksek ortalama Fen Bilgisi Öğretmenliği bölümünde en düşük puan ortalaması ise Sosyal Bilgiler Öğretmenliği bölümündedir. *İçerik uygunluğu boyutu* puan ortalamalarına bakıldığında en yüksek ortalama Psikolojik Danışma ve Rehberlik bölümünde, en düşük puan ortalamasının Fen Bilgisi Öğretmenliği bölümünde olduğu görülmektedir. *Öğretim elemanının konuya ilgisi boyutunda* en yüksek puan ortalamasına sahip bölüm Psikolojik Danışma ve Rehberlik bölümü iken en düşük puan ortalamasına sahip bölüm Türkçe Öğretmenliği bölümüdür. Son olarak *aşırı iş yükü boyutundaki* puan ortalamaları en yüksek ortalama sahip olan bölümün Türkçe Öğretmenliği, en düşük ortalama sahip olan bölümün ise Beden Eğitimi ve Spor Öğretmenliği bölümünün olduğunu göstermektedir. Beden eğitimi ve Spor öğretmenliği öğrencilerinin yüksek düzeyde yeterlik desteği algıladıkları, düşük düzeyde aşırı iş yüklerinin olduğunu düşündükleri söylenebilir. Öğrencilerin bölümleri ile akademik motivasyon ve motivasyonel çalışma koşullarının sosyal etkileşim, öğretim kalitesi ve özerklik desteği alt boyutları arasında ise anlamlı bir fark yoktur ($p>0,01$).

Tablo 4. Öğrencilerin Sınıfları ile Akademik Motivasyon ve Motivasyonel Çalışma Koşulları Düzeylerine Ait Tek Yönlü Varyans Analizi Sonuçları

Ölçme aracı	Sınıf	n	Ort.	Varyans Kaynağı	Kareler Toplamı	Sd.	Kareler Ortalaması	F	P
AMÖ	1.sınıf	122	132,47	Gruplar arası	2586,722	3	862,241	1,823	0,142
	2.sınıf	127	134,62						
	3.sınıf	132	128,62	Gruplar içi	238322,890	504	472,863		
	4.sınıf	127	133,28						
	Toplam	508	132,21	Toplam	240909,612	507			
MÇK-SE	1.sınıf	122	8,82	Gruplar arası	5,947	3	1,982	0,554	0,645
	2.sınıf	127	8,62						
	3.sınıf	132	8,53	Gruplar içi	1801,981	504	3,575		
	4.sınıf	127	8,62						
	Toplam	508	8,64	Toplam	1807,927	507			
MÇK-YD	1.sınıf	122	8,52	Gruplar arası	12,153	3	4,051	1,033	0,378
	2.sınıf	127	8,56						
	3.sınıf	132	8,51	Gruplar içi	1977,034	504	3,923		

	4.sınıf	127	8,88						
	Toplam	508	8,62	Toplam	1989,187	507			
MÇK-ÖD	1.sınıf	122	9,50						
	2.sınıf	127	9,79	Gruplar arası	14,571	3	4,857		
	3.sınıf	132	9,37	Gruplar içi				1,471	0,222
	4.sınıf	127	9,38		1664,332	504	3,302		
	Toplam	508	9,51	Toplam	1678,904	507			
MÇK-ÖEÖİ	1.sınıf	122	9,22						
	2.sınıf	127	9,18	Gruplar arası	3,693	3	1,231		
	3.sınıf	132	9,01	Gruplar içi				0,287	0,835
	4.sınıf	127	9,07		2164,740	504	4,295		
	Toplam	508	9,12	Toplam	2168,433	507			
MÇK-İU	1.sınıf	122	9,53						
	2.sınıf	127	9,58	Gruplar arası	14,413	3	4,804		
	3.sınıf	132	9,15	Gruplar içi				1,389	0,245
	4.sınıf	127	9,34		1743,666	504	3,460		
	Toplam	508	9,40	Toplam	1758,079	507			
MÇK-ÖK	1.sınıf	122	12,13						
	2.sınıf	127	12,46	Gruplar arası	52,489	3	17,496		
	3.sınıf	132	11,57	Gruplar içi				2,460	0,062
	4.sınıf	127	12,04		3584,181	504	7,111		
	Toplam	508	12,05	Toplam	3636,669	507			
MÇK-ÖEKİ	1.sınıf	122	8,73						
	2.sınıf	127	9,11	Gruplar arası	36,757	3	12,252		
	3.sınıf	132	8,88	Gruplar içi				2,835	0,038*
	4.sınıf	127	8,37		2177,989	504	4,321		
	Toplam	508	8,78	Toplam	2214,746	507			
MÇK- AİY	1.sınıf	122	7,40	Gruplar arası	11,700	3	3,900	0,629	0,597

2.sınıf	127	7,35				
3.sınıf	132	7,11	Gruplar içi			
4.sınıf	127	7,52		3125,324	504	6,201
Toplam	508	7,34	Toplam	3137,024	507	

*p<0,05; **p<0,01

MÇK-ÖEKİ Fark: 2.sınıf>4.sınıftan ve 4.sınıf <2. ve 3.sınıftan

Tablo 3'teki analiz sonuçlarına göre, araştırmaya katılan öğrencilerin sınıfları ile motivasyonel çalışma koşulları alt boyutlarından öğretim elemanının konuya ilgisi boyutu puan ortalamaları arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark olduğu görülmektedir ($F_{(3, 2177,989)} = 2,835$; $p<0,05$). Bu sonuca göre 2. Sınıf öğrencilerinin öğretim elemanının konuya ilgisi boyutu puan ortalamaları 4. Sınıf öğrencilerinden daha yüksektir. Öğrencilerin sınıfları ile akademik motivasyon ve motivasyonel çalışma koşullarının diğer alt boyutları arasında ise anlamlı bir fark yoktur ($p>0,01$).

Tablo 5. Öğrencilerin Cinsiyetleri ile Akademik Motivasyon ve Motivasyonel Çalışma Koşulları Düzeylerine Ait Tek Yönlü Varyans Analizi Sonuçları

Ölçme aracı	Cinsiyet	n	Ort.	Ss	t	Sd	p
AMÖ	Kadın	357	132,46	1,15948	0,393	506	0,694
	Erkek	151	131,62	1,75765			
MÇK-SE	Kadın	357	8,62	0,09619	-0,473	506	0,636
	Erkek	151	8,70	0,16693			
MÇK-YD	Kadın	357	8,59	0,10114	-0,528	506	0,598
	Erkek	151	8,69	0,17428			
MÇK-ÖD	Kadın	357	9,54	0,09547	0,617	506	0,537
	Erkek	151	9,43	0,15140			
MÇK-ÖEÖİ	Kadın	357	9,05	0,11036	-1,154	506	0,249
	Erkek	151	9,28	0,16475			
MÇK-İU	Kadın	357	9,46	0,09817	1,233	506	0,218
	Erkek	151	9,24	0,15267			
MÇK-ÖK	Kadın	357	12,10	0,14205	0,642	506	0,521
	Erkek	151	11,93	0,21728			
MÇK-ÖEKİ	Kadın	357	8,73	0,11108	-0,836	506	0,404
	Erkek	151	8,90	0,16856			
MÇK-İY/AİY	Kadın	357	7,49	0,12655	2,127	506	0,034*
	Erkek	151	6,98	0,21775			

*p<0,05;

Tablo 5' te yapılan analizler incelendiğinde, öğrencilerin cinsiyeti ile motivasyonel çalışma koşulları alt boyutlarından aşırı iş yükü boyutu puan ortalamaları arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark olduğu görülmektedir. ($t_{(506)} = 2,127$; $p<0,05$) Ortaya çıkan fark erkeklerin lehinedir. Öğrencilerin cinsiyeti ile akademik motivasyon ve motivasyonel çalışma koşullarının diğer alt boyutları arasında ise anlamlı bir fark yoktur ($p>0,05$).

SONUÇ, TARTIŞMA VE ÖNERİLER

Beden eğitimi öğretmen adayları ile diğer branş öğretmen adaylarının akademik motivasyon ve motivasyonel çalışma koşullarının incelenmesi amacıyla yapılan bu çalışmada elde edilen bulgular literatür bilgileri doğrultusunda tartışılmıştır. Bu amaç ile beden eğitimi öğretmen adayları ile diğer branş öğretmen adaylarının akademik motivasyon ve motivasyonel çalışma koşullarının; cinsiyet, sınıf ve bölüm türü değişkenleri açısından incelenmiştir.

Tek yönlü varyans analizi sonuçlarına göre, araştırmaya katılan öğrencilerin bölümleri ile motivasyonel çalışma koşulları alt boyutlarından yeterlik desteği, öğretim elemanı öğrenci ilişkisi, içerik uygunluğu, öğretim elemanının konuya ilgisi ve aşırı iş yükü puan ortalamaları arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark olduğu görülmektedir. Yapılan analizler incelendiğinde, öğrencilerin cinsiyeti ile motivasyonel çalışma koşulları alt boyutlarından aşırı iş yükü boyutu puan ortalamaları arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark olduğu görülmektedir. Ortaya çıkan fark erkeklerin lehinedir. Öğrencilerin cinsiyeti ile akademik motivasyon ve motivasyonel çalışma koşullarının diğer alt boyutları arasında ise anlamlı bir fark bulunmamıştır. Gömleksiz ve Serhatlıoğlu (2013), yaptığı çalışmada öğretmen adaylarının akademik motivasyon düzeylerine ilişkin görüşlerinin cinsiyet, sınıf düzeyi ve bölüm değişkenleri açısından anlamlı biçimde farklılaştığını belirlemiştir. Alemdağ, Öncü ve Yılmaz (2014) tarafından yapılan çalışma sonucunda, akademik motivasyon düzeyinin cinsiyet değişkenine göre kadın, sınıf değişkenine göre de birinci ve dördüncü sınıfta öğrenim gören katılımcıların lehine farklılaştığı görülmüştür. Gazalcı, Dal, Eker, Zengin, İnan ve Kurt (2024) tarafından yapılan çalışmada öğretmenlerin akademik motivasyon düzeyleri branşlarına göre bütün boyutlarda ve genel olarak sınıf öğretmenlerine göre branş öğretmenlerinin akademik motivasyon düzeyi daha yüksek düzeyde ölçülmüştür. Bu durum branş öğretmenlerinin akademik motivasyonlarının daha yüksek olduğunu göstermektedir. Bu araştırma sonucunda, beden eğitimi öğretmen adayları ile diğer öğretmenlik programlarında öğrenim gören öğretmen adaylarının akademik motivasyon düzeylerinin genel olarak benzer olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte, öğrencilerin motivasyonel çalışma koşullarına ilişkin algılarının özellikle bölüm değişkenine göre anlamlı farklılık gösterdiği saptanmıştır. Yeterlik desteği, öğretim elemanı-öğrenci ilişkisi, içeriğin uygunluğu, öğretim elemanının konuya ilgisi ve aşırı iş yükü boyutlarında ortaya çıkan bu farklılıklar, öğrenme ortamının niteliğinin öğrencilerin motivasyonel algıları üzerinde önemli bir etkisi olduğunu göstermektedir. Ayrıca cinsiyet değişkenine göre yalnızca aşırı iş yükü boyutunda, sınıf düzeyine göre ise yalnızca öğretim elemanının konuya ilgisi boyutunda anlamlı farklılık bulunmuştur. Elde edilen bulgular, öğretmen adaylarının akademik motivasyonlarının desteklenmesinde yalnızca bireysel özelliklerin değil, öğretim elemanlarının tutumları, ders içeriklerinin öğrencilerin ihtiyaçlarına uygunluğu ve öğrencilerin algıladıkları akademik iş yükü gibi çevresel faktörlerin de belirleyici olduğunu ortaya koymaktadır. Bu doğrultuda, öğretmen yetiştirme programlarında öğrencilerin motivasyonunu artıracak, destekleyici ve öğrenci merkezli öğrenme ortamlarının oluşturulmasının önemli olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

1. Öğretmen yetiştirme programlarında öğrencilerin akademik motivasyonlarını artırmak amacıyla öğretim elemanlarının öğrencilere yeterlik desteği sağlayan, teşvik edici ve yapıcı geri bildirimlerde bulunmaları sağlanmalıdır.

2. Öğretim elemanı-öğrenci ilişkilerini güçlendirmek için derslerde etkileşimi artıran, öğrenci katılımını destekleyen ve iletişimi kolaylaştıran öğretim yöntemlerine daha fazla yer verilmelidir.
3. Ders içerikleri, öğretmen adaylarının mesleki gereksinimlerine uygun, güncel ve uygulamaya dönük olacak şekilde düzenlenmelidir.
4. Öğrencilerin aşırı iş yükü algılarını azaltmak amacıyla ders, ödev ve sınav yükleri dengeli bir biçimde planlanmalıdır.
5. Özellikle motivasyonel çalışma koşulları açısından daha düşük puan ortalamasına sahip bölümlerde öğrenme ortamlarını iyileştirmeye yönelik düzenlemeler yapılmalıdır.
6. Son sınıf öğrencilerinin öğretim elemanlarının konuya ilgisine ilişkin algılarını artırmak için mesleki rehberlik, danışmanlık ve destek çalışmaları güçlendirilmelidir.
7. Kadın öğrencilerin daha yüksek düzeyde algıladıkları aşırı iş yükünü azaltmak amacıyla zaman yönetimi ve akademik destek programları uygulanabilir.
8. Farklı üniversitelerde ve farklı örneklem gruplarında benzer araştırmalar yapılarak bulguların genellenebilirliği artırılmalıdır.
9. Gelecekte yapılacak araştırmalarda akademik motivasyonu etkileyebilecek öz yeterlik, akademik başarı, kaygı ve mesleki tutum gibi değişkenler de incelenmelidir.
10. Nicel bulguların daha ayrıntılı açıklanabilmesi için nitel araştırma yöntemleri (görüşme, odak grup vb.) ile desteklenen karma yöntem çalışmaları yapılmalıdır.

KAYNAKÇA

- Alemdağ, C., Öncü, E., ve Yılmaz, A. K. (2014). Beden Eğitimi Öğretmeni Adaylarının Akademik Motivasyon ve Akademik Öz-Yeterlikleri. *Spor Bilimleri Dergisi*, 25(1), 23-35. <https://doi.org/10.17644/sbd.171304>
- Deci, E. L., and Ryan, R. M. (2000). The "what" and "why" of goal pursuits: Human needs and the self-determination of behavior. *Psychological inquiry*, 11(4), 227-268.
- Gazalcı, T., Dal, A., Eker, A., Zengin, M., İnan, M., ve Kurt, E. (2024). Öğretmenlerin akademik motivasyon düzeyleri. *International Journal of Social and Humanities Sciences Research (JSHSR)*, 11(103), 191-203.
- Gömlüksiz, M. N., ve Serhatlıoğlu, B. (2014). Öğretmen Adaylarının Akademik Motivasyon Düzeylerine İlişkin Görüşleri. *Türkiye Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 173(173), 99-128. <https://doi.org/10.20296/tsad.36644>
- Karagüven, M. H. (2012). Akademik motivasyon ölçeğinin Türkçeye adaptasyonu. *Kuram ve Uygulamada Eğitim Bilimleri*, 12(4), 2599-2620.
- Kılıç, S. (2013). Örneklem Yöntemleri. *Journal of Mood Disorders*, 3(1), 44-6. <https://doi.org/10.5455/jmood.20130325011730>
- Kaupper, T., Sobieraj, S., Fabian, S., and Gläser-Zikuda, M. (2012). Motivational conditions in academic learning situations: Development and validation of a questionnaire for higher education. *Zeitschrift für Pädagogische Psychologie*, 26(4), 281–295. doi:10.1024/1010-0652/a000079
- Uslu, S. (2021). Üniversite öğrencilerinde akademik motivasyonun yordayıcısı olarak öğretim elemanı davranışları ve öğrenme ortamı özellikleri. *Yükseköğretim ve Bilim Dergisi*, 11(2), 310–320
- Tabachnick, B. G. and Fidell, L. S. (2013). *Using multivariate statistics* (sixth ed.) Boston: Pearson.
- Vallerand, R. J., Pelletier, L. G., Blais, M. R., Brière, N. M., Senécal, C., ve Vallières, E. F. (1992). The Academic Motivation Scale: A measure of intrinsic, extrinsic, and amotivation in education. *Educational and Psychological Measurement*, 52(4), 1003–1017. <https://doi.org/10.1177/0013164492052004025>

İyad Kuneybî'nin *İnas* Adlı Romanının Teknik İncelemesi

Muhammed Nur KABBANİ

E-mail: kabbani931993@gmail.com ; Selçuk Üniversitesi, Edebiyat Fakültesi, Arap Dili ve Edebiyatı Bölümü, Konya / Türkiye.

Özet

Bu çalışmada, İyad Kuneybî'nin *İnas* adlı eseri teknik açıdan incelenmiştir. Öncelikle yazarın hayatı ve edebî kişiliği ele alınmış; Amman'da yaşayan akademisyen yazarın “eğlence ile faydayı birleştirme” anlayışı vurgulanmıştır. Ardından eser, konu, olay örgüsü, şahıs kadrosu, anlatıcı bakış açısı, zaman, mekân, dil-üslup ve anlatım teknikleri başlıkları altında değerlendirilmiştir. Roman, maddi hırslar uğruna dürüstlüğü kaybeden Samir'in, kızı İnas'ın ölümü sonrası yaşadığı manevi dönüşümü konu edinir. Temel düşünce, dünyevi başarının tek başına huzur getirmeyeceği ve kurtuluşun tövbe ile mümkün olduğudur. Olay örgüsü geriye dönüş tekniğiyle kurulurken, Samir merkezde; Ebu Azzam karşıt güç, İnas ve Emced ise manevi değerlerin temsilcileridir. Anlatımda kahraman anlatıcı ile hâkim bakış açısı birlikte kullanılmış, yaklaşık 35 yıllık bir zaman dilimi işlenmiştir. Mekânlar sembolik anlamlar taşıırken, dil -üslup didaktik, akıcı ve ayet-hadislerle desteklidir. Çalışma, Türkiye'de yeterince tanınmayan bu eser ve yazarı tanıtmayı amaçlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Arap Romanı , *İnas*, İyad Kuneybî, Teknik İncelemesi

Abstract

This study provides a technical analysis of Eyad Qunaibi's novel *Inas*. It first examines the author's life and his literary philosophy of "blending entertainment with benefit." The work is then evaluated through its theme, plot, characters, point of view, setting, language, style and narrative techniques. The novel depicts the spiritual transformation of Samir, who loses his integrity to material greed but seeks redemption following his daughter Inas's tragic death. The central theme asserts that worldly success lacks true peace, which is only found through repentance. Using flashback techniques, the plot positions Samir as the protagonist, Abu Azzam as the antagonist, and Inas as the symbol of spiritual values. Employing both first-person and omniscient narrators, the story spans 35 years. With symbolic settings and a didactic style supported by verses from the Quran and hadiths. The study aims to introduce this work and its author, not sufficiently well-known in Turkey.

Keywords: Arab Novel, *Inas* , Eyad Qunaibi, , Technical review.

GİRİŞ

Romanın incelemesinde nitel araştırma yöntemlerinden metin analiz yöntemi kullanılmıştır. Bununla birlikte çalışma yapılırken Nurullah Çetin'in *Roman Çözümleme Yöntemi* (Çetin, 2015), Mehmet Tekin'in *Roman Sanatı 1: Romanın Unsurları* (Tekin, 2017) ve Fatih Tepebaşı'nın *Roman İncelemesi* (Tepebaşı, 2019) adlı eserleri temel alınmıştır.

Romanın tarihsel evrimi; yapısal ve mahiyetsel açıdan klasik, modern ve postmodern olmak üzere üç ana döneme ayrılmaktadır (Çetin, 2015, s. 71). Modern roman, geleneksel şövalye anlatılarının ve fantastik unsurların yerini somut gerçekliğe bırakmasıyla şekillenmiştir. Bu dönemde anlatı, olağanüstü kahramanlardan sıradan bireye yönelerek bireyciliğin zaferini ilan etmiş; masalsı ve belirsiz zamanların aksine, olayları tarihsel bir gerçeklik ve mantıksal bir sebep-sonuç ilişkisi içine yerleştirmiştir. Okuyucunun aşına olduğu gerçekçi mekânlarda geçen bu kurgular, mucizelerden arınarak tamamen günlük yaşamın ve insan tecrübesinin bir yansıması hâline gelmiştir (Tepebaşı, 2019, ss. 17-18).

Modern çağın temel anlatı biçimi olan roman; tıpkı diğer edebî türler gibi kendine has bir işleyiş mantığına, yapısal düzene ve kuramsal bir temele sahiptir (Tekin, 2017, s. 9). İyad Kuneybi'nin *İnas* adlı romanı da bu edebî geleneğin bir yansımasıdır. Yaşanmış bir olaydan esinlenerek yazılmış bu roman, Samir adında bir karakterin hikâyesidir. Samir, statü kazanmak ve zengin olmak için dürtüst babasının yolundan çıkarak kayınpederi Ebu Azzam'ın hileli iş dünyasına girer. Para kazandıkça ailesinden ve dinî değerlerinden uzaklaşır. Kızı İnas ise saf ve dindar kişiliğiyle onun hayatındaki tek temiz ışıktır. İnas'ın trajik ölümü Samir için bir uyanış olur. Kardeşi Amced'in de yardımıyla Samir tövbe eder, kirli parayı bırakır ve temiz, huzurlu bir hayata başlar.

Bu çalışmada *İnas* romanının teknik yapısı incelenecektir.

1. ROMANIN TEKNİK İNCELEMESİ

1.1 Yazarın Hayatı ve Edebî Kişiliği

İyad Abdulhafız Kuneybi, 1975 yılında Kuveyt'te doğmuş Ürdünlü bir akademisyen ve İslami davetçidir. ABD Houston Üniversitesi'nden farmakoloji (eczacılık) alanında doktora derecesi almış ve profesör unvanıyla üniversitelerde görev yapmıştır (al-Jazeera, 2016). Geniş bir takipçi kitlesine sahip olan yazar, tefsir ve siyer alanlarına yoğunlaşmış, Kur'an-ı Kerim'i ezberlemiş ve icazet almıştır.

İnas, yazarın ilk romanı olup, düşünsel ve davetçi kimliğinden çıkarak fikirlerini edebî bir kurguyla sunduğu bir eserdir. Romanın temelini, yazarın "zorunlu inziva" (hapis) yıllarında kaleme aldığı düşünceler ve hayattan çıkardığı tecrübeler oluşturur. Edebî kişiliğinde, sahip olduğu analitik bilimsel altyapı ile psikolojik tahlilleri ve İslami ahlaki harmanlaması dikkat çeker. Yazın hayatında temel gayesi; inanç esaslarını, ateizm gibi modern akımlara karşı savunmak ve genç nesle bir "kimlik" bilinci aşılamaktır.

1.2 Romanın Adı

Bu romanın adı, başkarakter Samir'in kızı olan İnas'tan gelir. "İnas" kelimesi sözlükte "cana yakınlık, huzur verme, yalnızlığı giderme" anlamlarına gelir (Arap Dili Akademisi, 2004, s. 29).

Romanda İnas karakteri, gerçekten de Samir'in kötü ve maddi dünyasında ona huzur veren tek kişidir. Bu yüzden romanın adı, içeriğiyle çok uyumludur. Aralık 2021'de yayımlanan *İnas*, baskılarına göre 271 ila 299 sayfa arasında değişen, 26 bölümden oluşan bir romandır. Yazar eseri, özellikle 12-13 yaş ve üzeri gençlerin aileleriyle birlikte okuyup tartışabileceği, sürükleyiciliği giderek artan bir "eğitim aşısı" ve psikolojik bir reçete olarak kurgulanmıştır. Eser; sosyal, ailevi ve dinî bir roman olarak sınıflandırılmaktadır (Kuneybi, 2023).

1.3 Konu

Romanın ana konusu, modern çağda insanın dünyevi hırslar, statü ve maddi kazanımlar uğruna (yanlış kulvarda koşarak) (Kuneybi, 2023, s. 5) manevi değerlerini, ailesini ve nihayetinde kendi iç huzurunu kaybetmesidir. Helal kazancın bereketi, çocuk terbiyesinde ebeveynin rolü, ahireti unutup dünyaya dalmanın getirdiği "nimetler içindeki azap" eserin işlediği temel temalardır.

1.4 Olay örgüsü

Hadiselerin bir sebep ve buna bağlı bir sonuç ilişkisi içerisinde birbirini takip etmesi, teknik açıdan olay örgüsü olarak ifade edilir (Saîd, 2011, ss. 60-61). Romanda olaylar ana kahraman olan Samir'in etrafında cereyan etmektedir.

1.4.1 Serim

Ailenin en tembel çocuğu olan Samir, okulu bıraktıktan sonra babası onu çeşitli işlere sokar ancak o hiçbirinde dikiş tutturamaz. "Marangozluğu yorucu bulduğu için bırakır", "lokantada yeri temizlettikleri için işten ayrılır", "telefon tamiri kursunu yol uzak diye terk eder" (Kuneybi, 2023, s. 15). Babası Ebu Said sonunda ondan ümidini keser ve yorulur. Babasının vefatı üzerine miras paylaştırıldığında kardeşlerinin başarılı hayatlarını görüp aşağılık kompleksine kapılır ve ne pahasına olursa olsun zengin olmaya karar vererek içindeki hırsı şöyle dile getirir: "Ne pahasına olursa olsun, hangi şekilde olursa olsun o parayı ve statüyü elde etmek istiyorum! Evet... Hangi şekilde olursa olsun!" (Kuneybi, 2023, s. 23).

1.4.2. Düğüm

Samir'in bu hırsı onu hileli araç alım satımına yöneltir. Tamircisi Hişam, haram kazancı meşrulaştırmak için hasarlı arabayı ucuza tamir edip sattırır ve ona "Kurt ölmesin, koyun da tükenmesin" (Kuneybi, 2023, s. 25) felsefesini aşılar. Ardından bu hileli arabayı satın alan kargo çalışanı Alaa işini kaybedince Samir'e sarsıcı bir mesaj atar: "Allah senden intikam alsın!" (Kuneybi, 2023, s. 60). Zengin iş adamı Ebu Azzam ile ortaklığa giden yolda annesini ihmal eden Samir, lüks bir yemekte görüşmedeyken kardeşi Said'den "annesinin durumunun kritik olduğuna dair acil bir mesaj alır" (Kuneybi, 2023, s. 65). Ancak Samir ortaklığı bozulur korkusuyla hemen kalkıp gitmez ve hastaneye vardığında annesinin öldüğünü öğrenir. Eşi Hanan ile evlenip yozlaşmış bir zenginliğin içine düşer. Ailesi dağılır ve büyük oğlu Eşref uyuşturucudan hapse girer. Tek temiz kalan kızı İnas'ın İslami bir yaşama ve başörtüsüne yönelmesi, statü delisi eşi Hanan'ın şiddetli tepkisine neden olur. Kızı İnas "Başörtüsü takacağım" dediğinde, annesi Hanan statü korkusuyla çıldırır: "Başörtüsü mü?! Hem de bu yaşta?! Yaklaşan parti için bir bu eksikti! Arkadaşlarım seni başörtüsüyle mi görecektir..." (Kuneybi, 2023, s. 197). Ardından İnas zorla uluslararası bir okula nakledilir.

1.4.3. Çözüm

İnas'ın yeni okulunun servisiyle kaza geçirip vefat etmesi Samir'in hayatında bir şok etkisi yaratır. İnas'ın kanlı okul çantası ve namaz örtüsü karşısında yıkılan Samir, kızının odasında onun dilinden şu hayali isyanı duyar: "Baba, beni hayal kırıklığına uğrattın! Ben hizmetçinin kahvaltısına değil, ruhumun sevinçlerine açım... Kimsenin benim kanatlarımı kırpmaya hakkı yok... Beni sizin boğucu dünyanızda hapsedmeyin..." (Kuneybi, 2023, ss. 220-221). Yaşadığı derin vicdan azabı sırasında kardeşi, onu umutsuzluktan kurtarmak için annelerinin ölüm döşeğindeki son duasını aktarır: "Sonuçta o benim oğlum... Allah ona hidayet etsin ve ondan razı olsun" (Kuneybi, 2023, s. 230). Bu dua Samir'in tövbesine büyük bir kapı açar. Samir, kayınpederinin ofisine giderek haram dolu hayata rest çeker. "Ebu Azzam'ın önüne bir sürü anahtar fırlattı: Araba galerisinin anahtarı, restoran yönetim ofisinin anahtarı, tavuk çiftliğinin anahtarı... ve tabii ki villanın anahtarı..." (Kuneybi, 2023, s. 239). Oğlu Sadık'a lüks hayatı mı babasını mı seçeceğini sorduğunda Sadık, "Tabii ki seninle kalacağım" (Kuneybi, 2023, s. 252) der ve beraber helal rızık arayışına girerler. Tövbe eden Samir, dolandırdığı ilk kişi olan Alaa'dan helallik ister. Alaa şu erdemli cevabı verir: "Madem durum böyle, hakkımı hidayetinin şerefine helal ediyorum. Seni dünyada da ahirette de affettim!" (Kuneybi, 2023, s. 261). Ertesi gün İnas'ın okuluna giden Samir ve Sadık, İnas'ın vefatı anısına düzenlenen törende, İnas'tan etkilenen Reem adındaki bir kız arkadaşının onun anısını yaşatmak ve İslam'ı araştırdıktan sonra aldığı kararla başörtüsü taktığına şahit olurlar. Reem'in, "İnas içimizde ölmedi, onun başörtüsü de ölmedi" (Kuneybi, 2023, s. 265) sözleri Samir'e teselli olur. Son olarak hapisteki oğlu Eşref'i ziyaret edip umut aşılayan Samir, yepyeni ve helal bir hayata adım atar.

1.5 Şahıs kadrosu

Şahıs kadrosu, bir roman kurgusunun temel yapı taşlarından birini meydana getirir (Çetin, 2015, s. 144). Geniş bir şahıs kadrosu barındıran bu eser, gücünü gerçek bir hayat hikâyesinden almaktadır. Anlatılan dönemin kapsamı ve olayların niteliği, bu karakter zenginliğini zorunlu kılmaktadır. Yazar; farklı sosyal statülere, yaşlara ve cinsiyetlere sahip, pek çoğu gerçek yaşamdan alınmış kişileri başarılı bir kurguyla okura sunmuştur.

Samir. Esas kahraman, temel kişi, baş kişi de denir. Bu kişi romanın genelinde olayların merkezinde yer alır (Çetin, 2015, s. 148). Kardeşlerinin başarıları karşısında aşağılık kompleksine kapılıp zenginliği hedefleyen, ancak bu yolda manevi değerlerini ve ailesini kaybeden babadır. Babasının ölümünden sonra kardeşlerinin başarılarını gördüğünde içinden şöyle der: "Ne pahasına olursa olsun, hangi şekilde olursa olsun o parayı ve statüyü elde etmek istiyorum! Evet... Hangi şekilde olursa olsun!" (Kuneybi, 2023, s. 23). Daha sonra kızı İnas'ın ölümü ve bulduğu mektup, onun derin bir uyanış yaşamasına ve her şeyi geride bırakmasına vesile olur.

İnas. Samir'in en küçük kızıdır. Ailenin boğucu ve lüks hayatında temiz fitratı, ahlakı ve maneviyatı temsil eder. Babasına gelip açıkça "Başörtüsü takacağım" diyerek dindarlaşma isteğini ortaya koyar. Annesi tarafından zorla okuldan alınıp uluslararası okula verildikten sonra trafik kazasında vefat eder. Babasına bıraktığı notta şöyle yazar: "Baba, beni hayal kırıklığına uğrattın! Ben hizmetçinin kahvaltısına değil, ruhumun sevinçlerine... iman, sevgi ve merhametin gölgelediği bir eve açım... Beni sizin boğucu dünyanızda hapsedmeyin." (Kuneybi, 2023, ss. 220-221).

Ebu Azzam. Samir'in patronu ve kayınpederidir. İnsanları yalnızca çıkarları için kullanan, ahlaki değerleri hiçe sayan bir kapitalisttir. Ahlakı denizde yüzen odun parçalarına benzetir ve Samir'e şu dersi verir: "Bu parçaları denizdeki odunlar olarak hayal et... İlk rüzgarda yıkılacak yüksek idealler ve yüce değerler üzerine bina inşa edemeyiz... Bazen değerlerden vazgeçmek zorundasın." (Kuneybi, 2023, s. 103).

Emced. Samir'in en küçük kardeşi ve başarılı bir doktordur. Annesine düşkünlüğü ve dinî hassasiyetiyle Samir'in tam zıddı bir figürdür. Tıp öğrencisiyken annesinin hastalığı ağırlaşınca kendi kendine, "Seninle kalma ve sana tam zamanlı bakma şerefini kazanmak için dönemi dondurdum" (Kuneybi, 2023, s. 55) diyerek eğitimini askıya alır. İnas'ın ölümünden sonra Samir'e annesinin son sözlerini açıklayarak onu umutsuzluktan kurtarır: "Ne de olsa o benim oğlum... Allah ona hidayet etsin ve ondan razı olsun." (Kuneybi, 2023, s. 230).

Hanan. Samir'in eşi ve Ebu Azzam'ın kızıdır. Kızının dinî eğilimlerinden rahatsız olan, şekilci bir karakterdir.

Ebu Said ve Ümmü Said. Samir'in helal rızık peşinde koşan eski toprak ebeveynleridir. Ebu Said: Samir'i sabahları namaza kaldırıırken onun tembelliğine kızarak "Kalk çocuk! Ne din var ne dünya! Sabah namazını kılmadın, bizimle kahvaltı da etmedin..." der (Kuneybi, 2023, s. 9). Ümmü Said: Vefatından önce Samir'e kırgın olduğu için vasiyetinde onun adını dahi anmaz, sadece aldığı borcu tahsil etmelerini ister. Ancak kalbi elvermez ve ölmeden önce Emced'e Samir için gizlice dua eder.

Said. Başarılı bir mühendistir.

Asım. Babasına destek olmak için okulu bırakıp bakkalda çalışmaya başlayan fedakâr kardeşidir.

Tale. Psikoloji eğitimi alan, insanları anlamaya çalışan, genç kızlara ve ailelere eğitimler veren bir danışmandır. Samir'in çocukları için bile ona tavsiyeler verir.

Züheyr. Ebu Azzam'ın sekreteridir. Samir'in yükselişini kıskanır ve ona tuzaklar kurar.

Eşref ve Sadık. Samir'in çocuklarıdır. Eşref: Babasının ilgisizliği nedeniyle kötü arkadaşlıklar kurar ve uyuşturucu suçundan hapse düşer. Sadık: Öğrenme güçlüğü ve psikolojik sorunlar çeker. Ancak romanın sonunda, babası Samir tövbe edip lüks villayı terk ederken, annesinin sarayda kalma teklifini reddederek babasını seçer.

1.6. Anlatıcı ve Bakış Açısı

Şiir için mısra neyi ifade ediyorsa, roman kurgusu için de anlatıcı ve bakış açısı aynı derecede hayatidir. Yazarlar, sadece "ne" anlatacaklarına değil; anlatacakları dünyayı nasıl bir üslupla ve kimin gözünden aktaracaklarına dair derin bir sorgulama içindedirler (Tepebaşılı, 2019, s. 197). Hikâyenin bütün bileşenleri, merkezi figürün bakış açısıyla estetize edilerek okuyucunun zihninde şekillenir (Tekin, 2017, s. 61). Romanın giriş bölümünde olaylar, başkarakter Samir'in gözünden "Birinci Tekil Şahıs (Ben)" bakış açısıyla aktarılır. Hapisten çıkacak olan oğlu Eşref'i almaya giderken kendi iç hesaplaşmalarını, pişmanlıklarını ve çocuklarına vereceği hayat dersini planladığı bu bölüm, okuyucuyla samimi ve doğrudan bir bağ kurmayı sağlar. Samir, oğullarını karşılarırken onlara ne

anlatacağını düşünür ve kendi hayat hikâyesini bir ibret olarak sunmaya karar verir: "Neden onlara kendi hikâyemi anlatmıyorum? Kendi hikâyemi, ne de olsa onlar benim çocuklarım... Evet, başlangıcını görmediler, benimle yaşadılar ve hikâyemin sonlarını gördüler" (Kuneybi, 2023, s. 6). Bir diğer örnek ise anlatıcı, aktaracağı dersleri doğrudan birinci ağızdan sıralar: "Onlara, insanın alıştığı ama kendisine zarar verdiğini bildiği şeyleri bırakamamasının ne demek olduğunu anlatacağım..." (Kuneybi, 2023, s. 8).

Romanın kurgusu, olayların akışına ve karakterlerin iç dünyasına tamamen hâkim olan bir anlatıcı tarafından kurulmuştur (Tepebaşılı, 2019, ss. 214-221). Dolayısıyla eserin anlatım tekniklerinden biri de ilahî (Tanrısal) anlatıcıdır. Romanda yazar, tanrısal anlatım konumunu kullanarak olayların iç yüzünü anlatabilme yeteneği kazanmıştır. Yazar, Eşrefî karşılamaya giden Samir ve oğlu Sadık'ı yola çıkardıktan sonra, sadece Samir'in hislerini değil, tüm ailenin dinamiklerini, diğer karakterlerin iç dünyalarını ve yalnız kaldıklarındaki tepkilerini nesnel bir şekilde verebilmek için bu tekniği kullanmıştır. Anlatıcının her şeyi (geçmişi, geleceği, karakterlerin gizli niyetlerini) bildiği ve gördüğü bir konumdur. Tanrısal anlatıcı, Samir'in ibadet esnasında zihninden geçen, kimsenin bilemeyeceği hesapları ve şeytani vesveseleri okuyucuya aktarır. Samir namaz kılariken içinden araba kârını hesaplamaktadır: "On bir günde 400 dinar... yani ayda yaklaşık 1200 dinar... Estağfirullah... 'İyyake na'büdü ve iyyake nesta'in'... (okumaya devam eder, sonra rakamlar tekrar aklına hücum eder)" (Kuneybi, 2023, s. 27; Fatiha 1/4). Romanın girişinde "Ben" anlatıcı kullanılarak esere otobiyografik bir itiraf, günah çıkarma ve samimiyet havası verilmiştir. Hikâyenin asıl vakalarının yaşandığı geçmişe dönüldüğünde ise anlatım "Tanrısal bakış açısına" emanet edilmiştir. Bu değişim sayesinde okuyucu; sadece Samir'in bencil dünyasını değil, Ebu Azzam'ın sinsi planlarını, Hanan'ın yüzeysel arzularını ve İnas'ın tertemiz iç dünyasını yazarın her şeyi kuşatan nesnel anlatımıyla görebilme imkânı bulmuştur.

1.7. Zaman

Zaman, romanın ruhu olarak kabul edilir; zira kurmaca dünyanın özgünlüğünü kavramak ve okura geçirmek, ancak zamanın bu metinlerdeki işlevsel gücünü anlamakla mümkündür (Tekin, 2017, s. 129). Eserin genel zamanı, 45 yaşındaki Samir'in tüm ömrünü kapsar. Romanın başlarında Samir, oğullarına hikâyesini anlatmaya karar verirken kendi kendine şöyle sorar: "Acaba onlara yaşadığım kırk beş yılın olaylarını mı anlatacağım?!" (Kuneybi, 2023, s. 6). Asıl vaka zamanı onun yirmi yılı aşkın süren gaflet dönemine odaklanır. Yazar, Samir'in yanlış hedeflerle dolu hayatını romanın sonlarına doğru şu vurucu cümleyle özetler: "Yirmiden fazla yıl; annesinin vefatıyla başlayıp, Ebu Azzam'ın desteğini arzulayarak dünyaya daldığı ve kızının ölümüyle son bulan yirmi yılı aşkın bir süre..." (Kuneybi, 2023, s. 224).

Yazar, romanı şimdiki zamandan başlatıp geçmişe dönüşlerle ve zamanı hızlandırarak kurguyu dinamik tutar. Örneğin Samir, oğullarına ibretlik hikâyesini anlatmayı düşünürken aniden 35 yıl öncesine sıçrar. Yazar bu geçişi Samir'in iç sesiyle şöyle aktarır: "Belki de otuz beş yıl öncesinden, karakterimi temsil eden sıradan bir günün kesitinden başlamalıyım... On yaşıdayken..." (Kuneybi, 2023, s. 8). Geçmişe dönüldüğünde okur, Samir'in babası Ebu Said'in onu azarladığı o meşhur sahneyle karşılaşır: "Kalk çocuk! Kalk Samir... Saat 7:30, okul otobüsüne geç kalacaksın... Ne dinin var ne dünyanın!" (Kuneybi, 2023, s. 9).

1.8.Mekan

Bir romanın olay akışına ve şahıs kadrosunun etkileşimlerine zemin hazırlayan yer, anlatı dünyasının sahnelerini oluşturan mekân unsurudur (Çetin, 2015, s. 135). *İnas* adlı romanda mekân unsuru, sadece olayların geçip bittiği fiziksel bir arka plan değil; karakterlerin ruh hâllerini, manevi durumlarını ve temsil ettikleri değerleri yansıtan güçlü bir sembolik araç olarak kullanılmıştır. Yazar, maddi zenginlik ile manevi huzur arasındaki zıtlığı mekân tasvirleri üzerinden okuyucuya aktarır.

Eski aile evi. Romanın başlangıcında Samir'in çocukluk ve ilk gençlik anılarının geçtiği yerdir. Bu mekân, maneviyatın, sıcak aile bağlarının ve bozulmamış fitratın simgesidir. Samir geçmişi anımsarken bu mekânı şöyle tasvir eder: "Saray Mahallesi'ndeki evimizde anılar... O basit evlerin yerini uzun binaların, ofislerin ve ticari dükkânların aldığı mahalle" (Kuneybi, 2023, s. 11).

Yasemin villası. Samir'in Ebu Azzam'ın kızı Hanan ile evlendikten sonra yerleştiği lüks villadır. Ebu Azzam'ın daha önce yaşadığı bu mekân, gösterişin zirvesi olmasına rağmen sevgisizliğin ve ruhsal çölleşmenin merkezidir. Yazar bu mekânı Samir'in *İnas*'ı aradığı anlarda şöyle tanımlar: "Büyük ve çölleşmiş villa" (Kuneybi, 2023, s. 152).

Amced'in evi. Kardeşi Amced'in evi, Yasemin Villası'nın tam zıttı bir mekândır. Lüksten uzak, dengeli, İslami bir yaşamın ve iç huzurun sembolüdür. *İnas*'ın ruhunun bağlandığı yer burasıdır. Yazar bu evi lüksle değil, işlevsellik ve huzurla tasvir eder: "Amced'in kliniğindeki hasta yoğunluğunu gören biri onun lüks bir sarayda yaşadığını zannederdi, ama öyle değildi... Evi biraz geniş, süslemeleri az, aşırı lüksten uzak rahat mobilyalı ve orta büyüklükte bir bahçeye sahipti" (Kuneybi, 2023, s. 138).

Ebu Azzam'ın sarayı. Yozlaşmış kapitalist sistemin, kibrin ve manevi boşluğun zirve mekânıdır. Ebu Azzam'ın servetini ve gücünü sergilemek için kullandığı bu alan, *İnas*'ın temiz fitratına hiçbir şey ifade etmez. Hanan, *İnas*'ı amcasının evinden uzaklaştırmak için büyükbabasının sarayına götürür. Saray, "spor salonu, çeşitli oyunların bulunduğu bir bahçe, farklı türlerde kuş kafesleri, devasa bir akvaryum ve diğer lüks olanaklarla donatılmış" (Kuneybi, 2023, s. 191) olmasına rağmen, *İnas* için Amced'in evindeki güzel anların yerini tutamaz.

Romanın en kırılma noktaları olan ölüm ve uyanış anları bu mekânlarda gerçekleşir. "Rahmet Hastanesi" Samir'in hem annesini hem de yıllar sonra kızı *İnas*'ı kaybettiği, hatalarıyla ve kaçınılmaz sonla yüzleştiği mekândır. *İnas*'ın defin işlemi sırasındaki mezarlık tasviri Samir'in iç dünyasındaki karanlığı yansıtır: "Güneş mezarlığın üzerine batarken, yavaş yavaş çöken karanlıkla birlikte Samir'in kalbine de bir karanlık çöküyordu" (Kuneybi, 2023, s. 219). Bu mekânlar, Samir'in dünyevi hırslarının ne kadar boş olduğunu anladığı nihai uyanış yerleridir.

1.9 Dil ve Üslup

Edebî bir metin kurgulanırken anlatım (ifade), edebî dil ve üslup teknikleri ayrılmaz bir bütünlük sergiler. Metindeki ifade yapısı edebî dili beslerken, edebî dil de eserin üslup dünyasını tanımlayan temel unsurları gün yüzüne çıkarır (Önal, 2008, s. 23). *İnas* romanı, yazarın vermek istediği ahlaki ve manevi mesajları okura doğrudan hissettiren, psikolojik tahlillerle örülmüş özgün bir dil ve üsluba sahiptir. Her yaşta okuyucunun (özellikle 12-13 yaş ve üzeri gençlerin) rahatlıkla anlayabileceği, karmaşık ve şatafatlı tamlamalardan uzak, sade ama edebî bir dil (fasih Arapça) tercih etmiştir.

Eserde olayların anlatımı pürüzsüz ve sakin bir akışa sahiptir. Eserin genel anlatım dili, okuyucuyu yormayan bir yapıdadır. Ebu Azzam tarafından aldatıldığını anladığında kendi kendine yaptığı özeleştiri: "Ben deli miyim?! Kendi paramla aldığım arabaları serginin (Ebu Azzam'ın) adına kaydettirmeye nasıl razı oldum?! Hiçbir dinî ve ahlaki engeli olmayan bu adamın kurbanlarından biri olabileceğimi nasıl düşünemedim?!" (Kuneybi, 2023, s. 171).

Bir davetçi ve akademisyen olan yazar, romanın kurgusunu bozmadan dinî mesajları diyalogların ve olayların içine ustalıkla yerleştirmiştir (doğrudan vaaz/nasihat üslubu). Amced, kızı İnas'ı kaybettikten sonra ruhen çöken ve isyanın eşiğine gelen abisi Samir'i teselli ederken Kur'an-ı Kerim'den şu ayeti okuyarak dramatik bir etki yaratır: "Ölü iken dirilttiğimiz ve ona insanların arasında yürüyeceği bir nur verdiğimiz kimsenin durumu..." (Kuneybi, 2023, s. 226). Samir'in babası Ebu Said, çocuklarına Allah inancını (Allah'ı ta'zim etmeyi) öğretmek için, günahlarından dolayı ölüm döşeğinde çocuklarından kendisini yakıp küllerini savurmalarını isteyen adamın hadisini uzun uzadıya anlatır ve çocuklarına: "Bu adamı ne kurtardı evlatlarım? Allah'a olan tazimi (korkusu)..." (Kuneybi, 2023, s. 111) diyerek didaktik bir mesaj verir.

Eserde karakterlerin inançları ve hayata bakış açıları güçlü metaforlarla somutlaştırılarak anlatılmıştır. Yozlaşmış patron Ebu Azzam, kendi çıkarıcı ahlakını Samir'e bir metaforla anlatır: "Masanın üzerindeki şu parçaları denizdeki odunlar olarak hayal et... İlk rüzgarda yıkılacak yüksek idealler ve yüce değerler üzerine bina inşa edemeyiz... Bazen değerlerden vazgeçmek zorundasın. Eğer değerlerde ısrar edersen batarsın ve tahtalara tutunmak zorunda kalırsın" (Kuneybi, 2023, s. 103). İnas'ın ailenin içindeki varlığı, kurumuş bir ağaçta yeşeren bir filize benzetilir: "İnas, kurumuş, odunlaşmış ve görenin çoktan öldüğünü sandığı bir ağaçtan fışkıran yeşil bir damar (filiz) gibiydi... O, Samir'in kurak hayatında tam da böyleydi" (Kuneybi, 2023, s. 128). Kayıpların, yüzleşmelerin ve trajedi anlarının anlatımında yazar okuyucunun kalbine dokunan oldukça dramatik, hüznü ve sarsıcı bir ton kullanmıştır. İnas'ın vefatından sonra Samir'in bulunduğu veda niteliğindeki mektubun vurucu üslubu: "Baba, beni hayal kırıklığına uğrattın! Ben hizmetçinin kahvaltısına değil, ruhumun sevinçlerine; iman, sevgi ve merhametin gölgelediği bir eve açım... Beni sizin boğucu dünyanızda hapsetmeyin..." (Kuneybi, 2023, ss. 220-221).

Yazar, romandaki karakterlerin isimlerini rastgele seçmemiş; isimler karakterlerin taşıdığı anlamlar ve hikâyedeki işlevleriyle sembolik bir bütünlük (dinî ve ahlaki birer gösterge) oluşturacak şekilde kurgulanmıştır. *İnas* ismi huzur, ünsiyet ve yalnızlığı giderme anlamına gelir; karakterin babasının hayatındaki karanlığı aydınlatmasıyla birebir örtüşür. Keza Ebu Azzam'ın doğan torunlarına gösteriş için isim vermesi ve yazarın bunu eleştirel bir tonda sunması: "Şerefini korusun diye Eşref, yalanın yaygınlaştığı çağda dürüst olsun diye Sadık!" (Kuneybi, 2023, s. 115) diyerek isim-karakter tezatlığını üslubuna yansıtmıştır.

1.10. Anlatım Teknikleri

Yazar, kurgusal yapıyı güçlendirmek, karakterlerin psikolojik derinliğini yansıtmak ve olay akışını dinamik tutmak için çeşitli edebî anlatım tekniklerinden faydalanmıştır.

Yazar, başkarakter Samir'in içindeki çelişkileri, dünyevi hırslarını ve vicdan azabını okura aktarmak için iç monolog tekniğini yoğun bir şekilde kullanmıştır. Bu üslup, karakterin zihinsel gelgitlerini çok net gösterir. Örneğin Samir namaz kılarken bile zihninde kazandığı parayı hesaplar: "11 günde 400 dinar..."

yani ayda yaklaşık 1200 dinar... Estağfirullah... 'İyyake na'büdü ve iyyake nesta'in'... (okumaya devam eder, sonra rakamlar tekrar aklına hücum eder)" (Kuneybi, 2023, s. 27; Fatiha 1/4). Diğer örnekte olduğu gibi Samir'in kızı İnas'ın İslami bir hayata yönelme arzusunu ve ondan giderek uzaklaşmasını kendi içinde rasyonalize etmeye çalışırken içinden şöyle der: "Hayır, onu ben nakletmedim... Sadece tarafsız kaldım. Onu benim ve çevremizin özelliklerinden uzaklaştıran bu durumu düzeltmeleri için annesi ve anneannesine bıraktım" (Kuneybi, 2023, s. 203). Benzer bir yerde yine yazar iç monolog tekniğini kullanmıştır; kardeşi Amced, annesine bakmak için tıp fakültesini dondurma kararı alırken kendi kendine sorar: "Sadece tıp diploması değil, tüm eğitimim annemin sağlığı ve psikolojisi pahasına olacaksa ne işe yarar ki?!" (Kuneybi, 2023, s. 53).

Olayların arka planını aydınlatmak ve karakterlerin bugünkü durumlarının sebeplerini göstermek için şimdiki zamandan geçmişe yapılan sıçramalardır. Roman, 45 yaşındaki Samir'in kendi hayat hikâyesini ve hatalarını oğullarına anlatmaya karar verdiği şimdiki zamanla başlar. Ardından yazar, okuru doğrudan Samir'in çocukluğuna götürür: "Belki de 35 yıl öncesinden, karakterimi temsil eden sıradan bir günün kesitinden başlamalıyım... 10 yaşındayken..." (Kuneybi, 2023, s. 8).

Haberleşme amacıyla ortaya çıkan mektup, gelişim göstererek hem teknik bir terim hem de özgün bir anlatım biçimi kimliği kazanmıştır. Geniş bir uygulama alanı bularak resmî ve özel her türlü konunun ifade edilmesinde tarihsel bir köprü görevi görmüştür (Tekin, 2017, s. 244). Bu bağlamda yazar, karakterler arasındaki dramatik kırılmaları, sarsıcı yüzleşmeleri ve gizli hisleri aktarmak için notlar, mektuplar veya mesajlar kullanır. Bu teknik, okuyucuda anlık ve sarsıcı bir etki bırakır. Örneğin İnas'ın vefatından sonra Samir onun eşyaları arasında yürek burkan bir mektup bulur: "Baba, beni hayal kırıklığına uğrattın! Ben hizmetçinin kahvaltısına değil, ruhumun sevinçlerine; iman, sevgi ve merhametin gölgelediği bir eve açım... Beni sizin boğucu dünyanızda hapsedmeyin..." (Kuneybi, 2023, ss. 220-221). Yine başka bir yerde örnek olarak, Samir'in kusurlu bir arabayı yalan söyleyerek sattığı ve işini kaybetmesine sebep olduğu Alaa, ona sadece üç kelimelik kısa bir mesaj atar: "Allah senden intikam alsın!" (Kuneybi, 2023, s. 60). Benzer bir durumda Annesi Üm Said'in vefatından sonra okunan vasiyeti, Samir için bir yüzleşme aracıdır. Vasiyet "Sevgili çocuklarım Said, Asım, Tale, Amced..." diye başlar ve Samir'in adı anılmaz. Vasiyette sadece "beşinci kardeşiniz" denilerek Samir'den alınan 500 dinar borcun tahsil edilmesi istenir.

Hem doğal bir anlatım kanalı hem de yapısal bir teknik olan konuşma, roman sanatında önemli bir yere sahiptir. Romancılar, şahıs kadrosunu karşılıklı etkileşim içine sokarak metnin dokusunu kuvvetlendirmişlerdir (Tekin, 2017, s. 276). Eserimizde yazar; karakterlerin ahlaki seviyelerini, statü takıntılarını veya dinî duruşlarını karşılıklı diyaloglar aracılığıyla, herhangi bir betimlemeye ihtiyaç duymadan doğrudan gösterir. Samir'in ilk ticaret hilesini yaptığı esnada tamircisi Hişam ile olan diyalogu: Hişam: "Bazen değerlerden taviz vermelisin... Kurt ölmesin, koyun da tükenmesin" (Kuneybi, 2023, s. 25). Bu cümle, Samir'in tüm hayatı boyunca kendine kılıf yapacağı bir felsefeye dönüşür. Eşi Hanan'ın, kızı İnas'ın başörtüsü takma isteğine verdiği şiddetli tepki: "Başörtüsü mü?! Hem de bu yaşta?! Bu da yaklaşan parti için eksikti! Arkadaşlarım seni başörtüsüyle mi görecek... Seni amcanın evine göndermekle aptallık etmişim!" (Kuneybi, 2023, s. 197).

Yazar zamanın doğal akışını esnetmiş ve olayları gereksiz detaylara boğmadan özetleme tekniğini kullanmıştır. Buna örnek olarak; "Beş yıl geçti... Said mühendislik şirketinden mezun olup işe girdi ve

evlendi... Amced tıp fakültesini burslu kazandı... Samir ise 20 yaşına geldi ve hâlâ bir işi, diploması ya da öğrendiği bir mesleği yoktu..." (Kuneybi, 2023, s. 15).

Sonuç

İyad Kuneybi'nin *İnas* adlı romanı, modern anlatım teknikleri ile geleneksel ahlaki değerleri başarıyla mezceden bir inşa metnidir. Yapılan teknik inceleme neticesinde görülmektedir ki; eser sadece bir olay örgüsünden ibaret kalmamış, edebî unsurların her biri (zaman, mekân, şahıs kadrosu ve anlatım teknikleri) yazarın temel iletisi olan "fıtrata dönüş ve helal rızık" sancısını desteklemek amacıyla titizlikle kurgulanmıştır.

Olay örgüsü, "Serim, Düğüm ve Çözüm" basamaklarını takip ederek bireyin dünyevi hırslar içinde kayboluşunu ve ardından yaşadığı sarsıcı trajedilerle gelen hidayet sürecini mantıksal bir neden-sonuç ilişkisiyle sunar. Şahıs kadrosu, her biri bir düşünceyi veya toplumsal bir tipi temsil eden derinlikli figürlerden oluşmaktadır; özellikle Samir karakteri üzerinden "modern insanın manevi buhranı" ve *İnas* karakteri üzerinden "saf fıtratın direnişi" somutlaştırılmıştır. Yazarın anlatıcı ve bakış açısındaki esnekliği, okuru hem öznel bir samimiyetle hikâyeye dâhil etmiş hem de nesnel bir tanrısallıkla olayların arka planındaki tüm niyetleri görmesini sağlamıştır.

Zaman kavramının döngüsel ve hızlı değişim kullanımı anlatıya dinamizm katarken; mekân tasvirleri, karakterlerin ruhsal dönüşümlerini yansıtan sembolik birer düzlem olarak işlev görmüştür. Özellikle "Yasemin Villası" ile "Amced'in Evi" arasındaki zıtlık, eserdeki temel çatışmanın mekânsal izdüşümü niteliğindedir.

Yazar, edebî bir tür olarak romanın imkânlarını bir "davet ve tebliğ" aracına dönüştürürken romanını teknik kaliteden ödün vermeyen özgün bir yapıt hâline getirmiştir. Yazarın kullandığı sade ama etkili dil ve üslup, didaktik unsurları kurgunun içine ustalıkla yerleştirmiş; iç monolog, geriye dönüş ve mektup gibi tekniklerle de eserin psikolojik derinliği tahkim edilmiştir. Bu çalışma, romanın sadece edebî bir metin değil, aynı zamanda modernite ile gelenek arasında sıkışan günümüz insanı için bir "uyanış rehberi" niteliği taşıdığını ortaya koymaktadır.

KAYNAKÇA

- al Jazeera.** (2016, 23 Mayıs). *Iyad Kunaybi*. Erişim tarihi: 14 Mayıs 2026, <https://www.aljazeera.net/encyclopedia/2016/5/23/%D8%A5%D9%8A%D8%A7%D8%AF-%D8%A7%D9%84%D9%82%D9%86%D9%8A%D8%A8%D9%8A>
- Arap Dili Akademisi,** (2004). *El-Mu‘cemü’l-vasîf*. 4. Baskı. Kahire: Mektebetü’ş-Şurûkı’d-Devliyye.
- Çetin, N.** (2015). *Roman çözümleme yöntemi* (14. baskı). Ankara: Akçağ Yayınları.
- Kuneybi, İ.** (2023). *İnas* (1. baskı). İstanbul: Guraba Yayıncılık.

Kuneybi, İ. (2026). *Resmi sitesi*. Erişim tarihi: 14 Mayıs 2026, <https://eyadqunaibi.com/about>

Önal, M. (2008). *Edebi dil ve üslup*. Atatürk Üniversitesi Türkiyat Araştırmaları Enstitüsü Dergisi.

Saîd, E. (2011). *Raeytu Râmallah isimli romana yazılan mukaddime*. Beyrut: el-Merkezu's-Sekâfiyyu'l-Arabî.

Tekin, M. (2017). *Roman sanatı 1: Romanın unsurları* (15. baskı). İstanbul: Ötüken Neşriyat.

Tepebaşılı, F. (2019). *Roman incelemesi* (2. baskı). İstanbul: Çizgi Kitabevi Yayınları.

21. yy. Görsel İletişim Tasarımında Frig Kültürünün Göstergebilimsel Çözümlemeleri ve Bir Uygulama Örneği

Sümeyye KAVUTCU¹, Bilge KINAM²

¹E-mail: sumeyyekavutcu@gmail.com; Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Sanat ve Tasarım Fakültesi, Sanat ve Tasarım Anasanat Dalı, Eskişehir/ Türkiye.

²E-mail: bkinam@ogu.edu.tr; Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Sanat ve Tasarım Fakültesi, Sanat ve Tasarım Anasanat Dalı, Eskişehir/ Türkiye.

Özet

Görsel iletişim tasarımında, Anadolu uygarlıkları, kültürel birikimi ve sembolik değerleriyle eşsiz bir esin kaynağı oluşturmaktadır. Anadolu topraklarında konumlanan Frigya uygarlığı; kendine özgü sanatı, mitolojik anlatımları ve görsel anlatım diliyle tasarım dünyası için ilham verici bir referans kaynağıdır. Araştırmanın çıkış noktasını; yerel kültürel kodların çağdaş tasarım diline derinlemesine bir çözümleme ile aktarılma olmaları oluşturmaktadır. Bu araştırmanın amacı; Frig kültürüne ait sembol, desen ve mitolojik öyküleri tarihsel bağlamda inceleyerek 21. yüzyılın tasarım estetiği ile geçmiş ve gelecek arasında semantik bir köprü kurmaktır. Çalışma, Anadolu'nun bu kadim kültürel kodlarının, görsel tasarım aracılığıyla güncel bir estetik dile nasıl dönüşebileceğini ortaya koymuştur. Nitel araştırma yöntemiyle desenlenen çalışma; Frig uygarlığına ait motif ve sembollerin anlam katmanlarını, kültürel bağlamlarını göstergebilimsel yöntemle analiz etmiştir. Bulgular, Frig sembollerinin çağdaş tasarım aracılığıyla yerelden evrensel uzanan özgün bir görsel kimliğe dönüştürülebileceğini kanıtlamaktadır. Bu doğrultuda uygulama örneklerinin; kültürel mirasın görünür kılınmasına ve gelecek kuşaklara modern bir tasarım diliyle aktarılmasına katkı sağlaması hedeflenmektedir.

Anahtar Kelimeler: Frigya, görsel iletişim tasarımı, göstergebilim, kültürel miras, motif

Abstract

In visual communication design, the civilizations of Anatolia serve as a unique source of inspiration with their cultural heritage and symbolic values. The Phrygian civilization, which flourished on Anatolian soil, is an inspiring reference point for the design world with its distinctive art, mythological narratives, and visual language. The starting point of this research is the fact that local cultural codes have not been thoroughly analyzed and translated into a contemporary design language. The aim of this research is to examine the symbols, patterns, and mythological stories of Phrygian culture within their historical context, thereby establishing a semantic bridge between the past and the future through 21st-century design aesthetics. The study demonstrates how these ancient cultural codes of Anatolia can be transformed into a contemporary aesthetic language through visual design. Conducted using qualitative research methods, the study analyzes the layers of meaning and cultural contexts of motifs and symbols belonging to the Phrygian civilization using semiotic methods. The findings demonstrate

that Phrygian symbols can be transformed into a unique visual identity that spans from the local to the universal through contemporary design. In this regard, the aim is for the application examples to contribute to making cultural heritage visible and transmitting it to future generations through a modern design language.

Keywords: Phrygia, visual communication design, semiotics, cultural heritage, motif

GİRİŞ

İnsanlık tarihi boyunca görsel iletişim, bilgiyi aktarmanın en köklü biçimlerinden biri olmuştur. Yaklaşık 17.000 yıl öncesine tarihlendirilen Fransa'daki Lascaux ve İspanya'daki Altamira mağara resimleri, soyut sembolleri ve hayvan betimlemeleriyle görsel iletişimin örnekleri olarak kabul edilmektedir (Yaban, 2012, s. 976; Akıncı, 2023). Mağara resimlerinden hiyerogliflere, matbaanın icadından dijital medyaya uzanan bu süreç; görsel iletişim tasarımının yalnızca estetik bir pratik olmadığını, aynı zamanda kültürel belleği taşıyan güçlü bir iletişim aracı olduğunu ortaya koymaktadır. Estetik ve işlevselliği bir arada sunan görsel iletişim tasarımı; grafik tasarım, tipografi, fotoğraf, video, animasyon ve dijital medyayı kapsayan geniş bir uygulama alanına sahiptir. 20. yüzyılın ortasından itibaren televizyon ve sinema, 21. yüzyılda ise internet ve sosyal medya aracılığıyla toplumsal algıyı ve kültürel etkileşimi dönüştüren bu disiplin, bilgiye erişim biçimlerini köklü biçimde değiştirmiştir.

21. yüzyılın tasarımcıları, geçmişin kültürel mirasından ilham alarak çağdaş ve işlevsel çözümler üretmektedir. Bu bağlamda Anadolu, binlerce yıllık uygarlık birikimi ve zengin sembolik dünyasıyla günümüz tasarım pratiği için özgün bir kaynak niteliği taşımaktadır. Asya ile Avrupa arasında köprü işlevi gören bu coğrafya; Hititler, Lidyalılar ve Urartular gibi pek çok medeniyete ev sahipliği yapmış, her biri kendine özgü kültürel izler bırakmıştır. Bu medeniyetler arasında Frigya uygarlığı, özgün sanatsal ve kültürel birikimi açısından ayrı bir öneme sahiptir (Yılmaz, 2008, s. 354). Anadolu'da kültür ve sanatın gelişiminde önemli bir rol üstlenen Frigya uygarlığı, başta Yunan ve Roma olmak üzere kendisinden sonraki medeniyetleri derinden etkilemiştir. Frigler mimari, maden işçiliği, tekstil, heykel ve el sanatları gibi alanlarda özgün eserler ortaya koymuştur (Akkaya ve diğerleri, 2021, s. 18-22)

Çiftçilik ve hayvancılığı temel geçim kaynağı olarak benimseyen Frigler, doğanın ve toprağın bereketini simgeleyen Ana Tanrıça Kybele'ye ibadet etmiştir. Roller'a (2004) göre "Kybele" adı ilk kez MÖ 7. yüzyıla ait Frig yazıtlarında geçmekte olup bu durum, figürün Anadolu kökenini belgeleyen en erken kanıt niteliğindedir (s. 31). Doğu'dan Batı'ya uzanan kültürel etkileşim sürecinde farklı coğrafyalarda yeniden farklı biçimlerde yorumlanan Kybele, zamanla evrensel bir anlam kazanmıştır. Kybele'nin kazandığı bu evrensel anlama karşılık söz konusu kültürel mirasın Türkiye'ye yeterli düzeyde yansımamıştır. Bu durum Türkiye'de özgün bir tasarım kimliğinin oluşturulamaması açısından önemli bir sorun olarak öne çıkmaktadır. Bu sorunun başka bir somut yansıması olarak Frigya uygarlığına ait meander motif ve Frig şapkası, uluslararası alanda geniş bir kullanım alanı bulmuştur. Givenchy ve Versace gibi lüks markaların logolarında ve New York'un kültürel simgesi hâline gelen "anthora" kahve

bardağında meander motifi görülmektedir. Fransız Devrimi'nde özgürlük düşüncesinin sembolü hâline gelen Frig şapkası ise Arjantin, Küba, Bolivya ve Kolombiya gibi ülkelerin ulusal armalarında yer almaktadır (Büyükyıldırım, 2021). Frig şapkası, milyonlarca çocuğun izlediği “Şirinler” çizgi filminde Şirin Baba karakterinin başlığı olarak da bilinmektedir (Yıldız, 2024). Kökenini Anadolu'dan alan bu kültürel sembollerin sanat, popüler kültür ve günlük yaşamın pek çok alanında bu denli yaygın biçimde yer bulması; bu kültürel birikimin çağdaş görsel iletişim tasarımına entegre edilmesinin hem bir gereklilik hem de bir fırsat olduğunu açıkça ortaya koymaktadır.

Bu araştırma; Frig kültürüne ait seramik ürün yüzeylerinde yer alan motiflerin göstergebilimsel çözümlemelerini yaparak bu öğelerin çağdaş görsel iletişim tasarımına nasıl entegre edilebileceğini uygulamalı örneklerle ortaya koymayı amaçlamaktadır. Çalışmanın temel sorusu, Frig seramik motiflerinin Barthes'ın göstergebilimsel modeli çerçevesinde nasıl anlam katmanlarına ayrılacağı ve bu katmanların çağdaş tasarım diline nasıl aktarılacağıdır. Tasarım dünyasında sembol ve motiflerin kullanımı, anlam ve kültürel kimlik oluşturmak açısından güçlü bir araç olarak kabul edilmektedir (Uyan Dur, 2015, s. 448). Bu bağlamda Frig kültürüne ait sembol ve motifler, kültürel mirasın tasarım diliyle yeniden üretilmesi açısından özgün bir potansiyel taşımaktadır. Bu doğrultuda tekstil ve giyim ürünleri, ev ve yaşam ürünleri ile seramik yüzey uygulamalarını kapsayan çeşitli günlük kullanım nesneleri tasarlanmış; söz konusu ürünlerin Anadolu kültürünü tanıtan hediyelik eşya olarak sunulması hedeflenmiştir.

Kütahya, Afyon ve Eskişehir il sınırlarına yayılan Dağlık Frigya Bölgesi, UNESCO Dünya Miras Geçici Listesi'nde yer almasına karşın turizm ve arkeolojik miras açısından en az tanınan bölgeler arasında kalmaya devam etmektedir (UNESCO, 2015). Çiçek ve Kozak'a (2022) göre Eskişehir'in sanat ve kültür, Afyonkarahisar'ın termal turizm, Kütahya'nın çini ve seramik alanlarındaki kimliği tesadüf değil; kökleri Frigler'e uzanan uzun bir tarihin ürünüdür (s. 264)-. Buna karşın bu köklü geçmiş, görsel iletişim tasarımı aracılığıyla yeterince görünür kılınamamaktadır. Uyan Dur'a (2015) göre kültürel mirastan beslenen görsel iletişim tasarımı, Türkiye'nin küresel tasarım alanında özgün ve tanınır bir kimlik kazanmasına zemin hazırlayacaktır (s. 452). Bu bağlamda Frig kültürüne ait sembol ve motiflerin görsel iletişim tasarımına entegre edilmesi, yalnızca tasarım çeşitliliğini artırmakla kalmayıp Türkiye'nin kültürel kimliğini uluslararası alanda görünür kılma açısından da büyük önem taşımaktadır. MÖ 12. yüzyıldan bu yana yaklaşık 2800 yıl geçmesine karşın Frigya uygarlığına ait semboller evrensel ölçekte varlığını sürdürmektedir.

YÖNTEM

Bu çalışmada nitel araştırma yöntemi kapsamında Frig seramik ürün yüzeylerindeki motiflerin anlamlarını analiz etmek için göstergebilimsel çözümleme yöntemi uygulanmıştır. Görsel tasarım ürünlerinde yer alan anlamları çözümlemek ve yeniden anlamlandırabilmek açısından göstergebilimsel yaklaşımlara ihtiyaç duyulmaktadır. Göstergebilim yöntemi çerçevesinde kuramsal açıdan faydalanan tasarımcılar, bir tasarım ürününde anlamın nasıl somutlaştırıldığını ve hedef kitleye nasıl iletildiğinin bilincindedir (Kaptan & Sayın, 2010, s. 818). Bu doğrultuda göstergebilim yöntemi; antik medeniyetlere ait kültürel yaklaşımların semboller üzerindeki etkilerini anlamak, bu sembollerin taşıdığı anlam katmanlarını çözümlemek ve günümüz görsel iletişim tasarımına nasıl aktarıldığını değerlendirmek

açısından önemli bir analiz aracı sunmaktadır. Her türlü iletişim eyleminin oluşmasında göstergeler vazgeçilmez unsurlardan olmuştur (Yasa, 2013, s. 276). Sembolik etkileşim teorisine göre insanlar bulundukları çevrenin yanı sıra sembolik bir çevrede yaşarlar. Anlam, insanların günlük yaşamda bir kavrama verdikleri içerikleri ifade ederken, değer ise insanların bu kavrama karşı takındıkları duygu ve tavırları anlamına gelmektedir (Mead, 1907, s. 110). Bu doğrultuda Frig seramik yüzeylerinde kullanılan semboller dönemin kültürü, inancı ve toplumsal bağlamı açısından anlamlandırılabilir. Frig seramik ürün yüzeylerinde kullanılan motifler, evrensel anlam taşıyan sembollerle birlikte Frig kültürüne ait inanç, yaşam biçimi ve estetik anlayışı harmanlayan çok katmanlı görsel bir dil oluşturmaktadır.

Araştırmanın örneklemini Frig dönemine ait seramik ürün yüzeylerindeki motifler oluşturmaktadır. Veriler literatür taraması yoluyla toplanmıştır. Veri analizi sürecinde önce Frig seramik motiflerine ilişkin literatür taraması yapılmış, ardından motiflerin Frig kültüründeki inanç, yaşam biçimi ve estetik anlayışla bağlantısı kurularak kültürel bağlamı ortaya konmuştur. Son aşamada Barthes'ın düz anlam ve yananlam kavramları çerçevesinde motiflerin anlam katmanları çözümlenmiştir. Araştırmada Barthes'ın düz anlam ve yan anlam yaklaşımının tercih edilmesi; bu yaklaşımın kültürel göstergelerin tarihsel ve mitolojik anlam katmanlarını açığa çıkarmaya elverişli bir çerçeve sunmasından kaynaklanmaktadır (Parsa, 2004). Göstergebilimsel çözümlemelerden elde edilen bulgular doğrultusunda Frig kültürüne ait sembollerin çağdaş görsel iletişim tasarımına entegrasyonuna yönelik uygulamalı örnekler geliştirilmiştir.

BULGULAR

Bu bölümde Frig seramik ürün yüzeylerinde tespit edilen motifler göstergebilimsel çerçevede ele alınmıştır. Her motif; görsel tanımı (düz anlam), kültürel bağlamı ve taşıdığı sembolik anlam (yananlam) açısından tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1 incelendiğinde, Frig seramik motiflerinin düz anlam çerçevesinde geometrik ve organik biçimler olarak tanımlandığı, yan anlam çerçevesinde ise Frig toplumunun inanç sistemi, yaşam biçimi ve mitolojik anlatılarıyla doğrudan ilişkilendirildiği görülmektedir. Barthes'ın anlamlandırma kuramında düz anlam, birinci anlam düzlemi olarak göstergede "ne" gösterildiğini ortaya koyarken; yan anlam, ikinci anlam düzlemi olarak görünenin altında yatan değer ve anlamları açığa çıkarmaktadır (Çeken & Asuman, 2016, s. 512). Bu yaklaşım, Frig seramik motiflerinin yalnızca biçimsel özelliklerinin ötesinde kültürel ve mitolojik anlam katmanlarının çözümlenmesinde işlevsel bir çerçeve sunmaktadır.

Tablo 1. *Frig Seramik Motiflerinin Göstergebilimsel Çözümlemesi*

Motif	Düz Anlam	Kültürel Bağlam	Yan Anlam
	Işın Motifi Merkezden çevreye doğru uzanan, sivri uçlu ve iç içe geçmiş motiftir.	Frig kültürünün çok tanrılı dini yapısında Güneş tanrısı Sabazios'un ışık ve aydınlıkla ilişkilendirilmektedir. Antik kültürlerde güneşin yaşamın kaynağı ve düzenin simgesi olarak kabul edilmiştir.	Tanrısallık, kutsal ışık, yeniden doğuş ve yaşam.
	Meander Dik açılı ya da eğrisel kıvrımların birbiri içine geçerek oluşturulmuştur.	Büyük Menderes Nehri'nden adını almaktadır. Tapınak, mezar ve adak eşyalarında kutsal unsur olarak kullanılmıştır (Uslu Azarak & Yariş, 2026, s. 220).	Sonsuzluk, birlik, süreklilik ve yeniden doğuş.
	Eş Merkezli Daire İç içe geçmiş dairelerden oluşmaktadır.	Frig kültüründe Ana Tanrıça Kybele inancıyla ilişkilendirilmiştir.	Bütünlük, sonsuzluk, bereket, yaşam döngüsü ve Kybele.
	Üçgen Seramik kapların gövde ve boyun kısmını çerçeveleyen; yukarı/aşağı bakan, taban tabana ve uç uca yerleştirilen biçimleriyle karşımıza çıkmaktadır.	Frig seramiklerinde ve kutsal anıtlarında yaygın biçimde kullanılmıştır (İlhan, 2013).	Tanrısallık, doğurganlık, yaşam döngüsü, beden-zihin-ruh bütünlüğü.
	Eşkenar Dörtgen (Baklava/ Ağ) Baklava, ağ ya da iç içe geçmiş üçgenler biçiminde kullanılmıştır.	Neolitik ve Paleolitik dönemlere uzanan ve Frig seramiklerinde özgün geleneği sürdürerek ağ biçiminde uygulanmıştır (Kızıllı, 2020, s. 40).	Yaratma gücü, kadın doğurganlığı, ekilmiş tarla, yaşam.

	Zikzak	Birbirine bağlanan keskin dik çizgilerden oluşmaktadır.	Antik Mısır ve Mezopotamya’da yaygın biçimde kullanılan motif, Yunan vazolarından Frig sanatına geçmiş ve Olgun Frig stilinin ana motifi hâline gelmiştir (Worrel, 2024).	Su, hareket, değişim, doğanın döngüselligi.
	Hayat Ağacı	Gövde ve dallarından aşağıya inen uzun çizgilerle çam ağacını anımsatır.	Kybele mitolojisiyle ilişkilendirilen motif; çam ağacının kurumayan yapısı ve uzun ömrü nedeniyle Frig topluluğunda kutsal kabul edilmiştir (Köroğlu, 1996, s. 35-36).	Yaşam ve ölüm döngüsü, yeniden doğuş, sonsuzluk.
	Dağ Keçisi	Hafif yukarı bükülmüş büyük boynuzlarıyla stilize edilen ve çoğunlukla hayat ağacıyla birlikte kullanılır.	Attis’i temsil eden kutsal hayvan olarak kabul edilen dağ keçisi, totemizm inancından beslenen Frig kültüründe doğa ve yaşamla bağlantılı bir sembol olarak yer almıştır (Köerte & Köerte, 1904, s. 56-57)	Ölümsüzlük, yeniden doğuş, doğanın koruyuculuğu, Kybele’nin koruyucusu.

Göstergebilimsel analizin sonucunda Frigya uygarlığına ait seramik ürün yüzeylerinde yer alan motif ve sembollerin yalnızca süsleme amacı taşımadığı, aynı zamanda Friglerin inanç sistemi, yaşam biçimi ve kültürünü yansıtan sembolik bir anlam taşıdığı görülmektedir. Frig motiflerinin her birinin bu denli anlam yüklü olması, onların yalnızca tarihsel bir unsur olmaktan ziyade günümüz tasarım anlayışı için de önemli bir kaynak hâline geldiğini göstermektedir.

Göstergebilimsel çözümlemeyle elde edilen bulgulardan hareketle Frig seramik motifleri; dağ keçisi ve hayat ağacı kompozisyonları, meander motifleri ve geometrik motifler olarak üç başlık altında ele alınmıştır. Motifler; kullanım sıklıkları, taşıdıkları sembolik anlamlar ve biçimsel özellikleri bağlamında değerlendirilerek gruplandırılmıştır. Bu doğrultuda Frig seramiklerinde yoğun biçimde karşılaşılan geometrik motifler, kültürlerarası etkileşimle günümüze kadar varlığını sürdüren meander motifi ile dağ keçisi ve hayat ağacı kompozisyonları temel tasarım öğeleri olarak belirlenmiştir. Özellikle dağ keçisi ve hayat ağacı kompozisyonları Frig mitolojisi ve inanç sistemiyle ilişkili güçlü sembolik anlamlar taşımasıyla dikkat çekmektedir.

Tasarım sürecinde elde edilen göstergebilimsel veriler çerçevesinde motifler ritim, tekrar, denge, simetri ve bütünlük gibi görsel iletişim tasarımı ilkeleri doğrultusunda yeniden yorumlanmıştır. Motifler özgün

yapıları korunarak çağdaş tasarım anlayışına uygun çeşitli kompozisyonlar kurgulanmış ve farklı ürün yüzeylerine aktarılmıştır. Tasarım uygulamalarında renk tercihi ise Frig seramiklerindeki üç dönemin özgün renk anlayışından esinlenerek belirlenmiştir. Erken Frig stilinin “brown-on-buff” tekniğindeki açık krem zemin üzerine koyu kahverengi ve kırmızı tonlar ile Geç Frig stilinin turuncu-kiremit zeminindeki koyu kırmızı-kahverengi renk anlayışı tasarımların temel renk paletini oluşturmuştur (Parlak & Şekerci, 2021, s. 330). Bu doğrultuda toprak tonları ve kırmızı renk paleti hem dönemin kültürel dokusunu yansıtmak hem de motiflerin özgün görsel kimliğini çağdaş ürün yüzeylerine taşımak amacıyla kullanılmıştır.

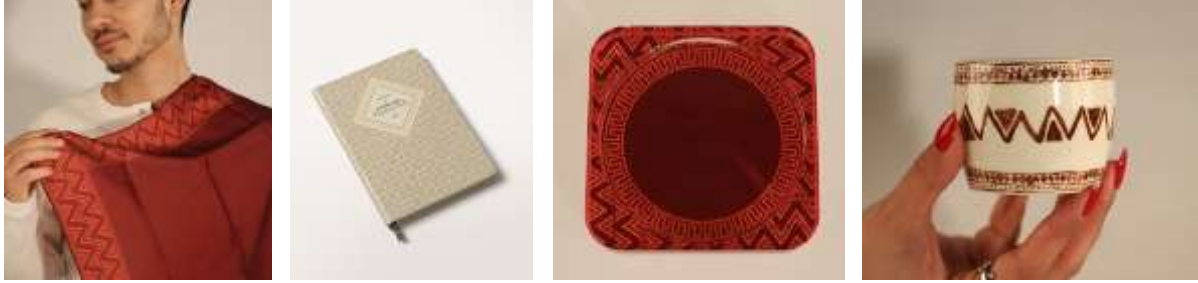
Tablo 2. Dağ keçisi ve hayat ağacı motifleri üzerine tasarım uygulamaları



Dağ keçisi ve hayat ağacı motifleri, seramik ürün yüzeyinde görülen özgün formlarına bağlı kalınarak dijital ortamda yeniden çizilmiştir. Frig seramiklerinde sıklıkla karşılaşılan meander ve geometrik motiflerle birlikte yeni kompozisyonlar oluşturulmuştur. Hayvan figürleri kare ve daire kompozisyon düzenleri içerisine yerleştirilmiş, çevresine meander ve eş merkezli daire motifleri eklenerek dengeli ve ritmik bir kompozisyon elde edilmiştir.

Geliştirilen tasarımlar; sweatshirt, tişört, kanvas çanta ve şapka yüzeylerinde nakış tekniğiyle, ipek-saten fular ve keten yastık yüzeylerinde baskı tekniğiyle uygulanmıştır. Seramik ürün yüzeylerinde ise dağ keçisi, kartal ve hayat ağacı motifleri sır altı boyama tekniğiyle hazırlanmıştır. Aynı motiflerin farklı ürün yüzeylerinde tutarlı biçimde uygulanmasıyla ürünler arasında görsel bir bütünlük sağlanarak bütüncül bir koleksiyon anlayışı geliştirilmiştir (tablo 2).

Tablo 3. Geometrik motifler üzerine tasarım uygulamaları



Frig seramiklerinde önemli bir yere sahip olan geometrik motiflerden üçgen, zikzak, baklava ve dama motifleri dijital ortamda yeniden çizilmiştir. Motifler; üst üste ekleme, döndürme, çoğaltma ve diyagonal yerleşim gibi kompozisyon yöntemleriyle yeniden yapılandırılmıştır. Geliştirilen geometrik motif tasarımları; ipek-saten fular, keten yastık, telefon kılıfı ve ajanda yüzeylerinde baskı tekniğiyle, seramik bardak yüzeylerinde ise sır altı boyama tekniğiyle uygulanmıştır (tablo 3).

Tablo 4. Meander motifi üzerine tasarım uygulamaları



Frig seramiklerinde yer alan meander motifi; kesintisiz ve tekrar eden yapısıyla yüzeyde süreklilik ve ritim oluşturan görsel bir öge olarak öne çıkmaktadır. Tasarım sürecinde motif bir birim olarak ele alınmış; ayna simetrisi ve 180 derece döndürme yöntemiyle çoğaltılarak ritmik bir düzen oluşturulmuştur. Meander motifi tasarımları ipek-saten fular ve keten yastık yüzeylerinde baskı tekniğiyle, seramik bardak yüzeylerinde ise farklı meander motifleri sır altı boyama tekniğiyle hazırlanmıştır (tablo 4).

SONUÇ VE TARTIŞMA

Bu araştırmada Frigya uygarlığına ait seramik ürün yüzeylerinde yer alan motifler göstergebilimsel bir çerçevede incelenerek motiflerin kültürel, mitolojik ve sembolik anlam katmanları ortaya konulmuştur. Frigya uygarlığının mimarisi, tekstili vb. diğer sanat alanları kapsam dışında bırakılmıştır. Elde edilen bulgularla birlikte Frig seramik sanatında kullanılan motiflerin toplumun inanç sistemini, mitolojik anlatılarını ve kültürel belleğini gelecek kuşaklara aktaran görsel bir dil işlevi taşıdığı ortaya koyulmuştur. Frig seramiklerinde bulunan motiflerin sınırlı sayıda sembolden oluşmasına karşın üçgen sembolünün baklava, zikzak ve içi dolgulu/dolgunsuz biçimlerde; eş merkezli dairenin ise farklı kompozisyon ve kombinasyonlarla kullanılması, bu motiflerin yalnızca yüzey süslemesi

olmadığını, kültürel belleği taşıyan sembolik unsurlar olduğunu kanıtlamaktadır. Göstergebilimsel çözümleme sonucunda her motifin kendine özgü anlam katmanları taşıdığı anlaşılmıştır. Işın motifinin Güneş tanrısı Sabazios inancıyla ilişkili olarak tanrısallığı ve kutsal ışığı; eş merkezli dairenin Ana Tanrıça Kybele'nin doğurganlık ve sürekliliğini; meander motifinin ise sonsuzluğu ve kesintisiz yaşam döngüsünü temsil ettiği sonucuna ulaşılmıştır. Üçgen motifinin kadın doğurganlığını ve üretkenliği simgelediği; hayat ağacı ve dağ keçisi motiflerinin birlikte kullanımının ise Kybele-Attis ilişkisinin görsel bir ifadesi olarak değerlendirilebileceği anlaşılmıştır. Araştırma kapsamında geliştirilen tasarım uygulamalarında Frig seramik sanatına ait motifler; tekstil, seramik ve ev yaşam ürünlerinde; nakış, serigrafi ve sır altı boyama teknikleriyle çağdaş tasarım diliyle yeniden yorumlanmıştır. Farklı tekniklerle yorumlanan çağdaş ürünlerle, Eskişehir'in kültürel mirasını yansıtan özgün bir koleksiyon hazırlanmıştır.

Bu bulgular, Uyan Dur'un (2015) kültürel mirastan beslenen tasarımın özgün kimlik oluşturmadaki rolüne ilişkin tespitleriyle örtüşmektedir (s. 450-451). Bununla birlikte söz konusu çalışmadan farklı olarak bu araştırma, soyut sembolik analizi somut ürün tasarımlarıyla ilişkilendirerek kuramsal boyutu uygulamayla bütünleştirmiştir. Anadolu kökenli meander motifi ve Frig şapkası gibi kültürel sembollerin uluslararası alanda yaygın biçimde kullanılmasına karşın Türkiye'nin tasarım pratiğine yeterince yansımaması önemli bir eksiklik olarak öne çıkmaktadır. Bu çalışma; yerel kültürel değerlerin çağdaş tasarım süreçlerine entegre edilebileceğini ve UNESCO Dünya Miras Geçici Listesi'ndeki Dağlık Frigya Bölgesi'nin kültürel potansiyelinin görsel iletişim tasarımı aracılığıyla görünür kılınabileceğini ortaya koymaktadır.

Araştırmanın sonunda görsel iletişim tasarımının yalnızca estetik üretim sürecinden ibaret olmadığı, aynı zamanda kültürel anlamların hedef kitleye aktarılmasını sağlayan bir iletişim biçimi olduğu sonucuna varılmıştır. Bu doğrultuda yapılan araştırmada Frig motifleri yalnızca dekoratif süslemeler olarak değil, kültürel belleği taşıyan göstergeler olarak ele alınmıştır. Göstergebilimsel çözümlemeler sayesinde Frig motiflerinin taşıdığı anlam katmanları belirlenmiş ve bu anlam katmanları çağdaş tasarım dili içerisinde yeniden yorumlanmıştır. Araştırmanın sonucunda kültürel mirasımızı işaret eden göstergelerin çağdaş görsel iletişim tasarımı aracılığıyla yeniden ele alınabileceği ve gündelik yaşam nesneleri üzerinden görünür kılınabileceği anlaşılmıştır. Böylelikle bu çalışma kültürel sürdürülebilirlik açısından önemli bir katkı sunmaktadır.

Araştırma, Frig uygarlığına ait seramik yüzeylerindeki motiflerle sınırlandırılmıştır. İleride yapılacak çalışmalarda, Frig motiflerinin tüketici algısı üzerindeki etkisinin anket veya odak grup yöntemleriyle ölçülmesi, tasarımların kültürel iletişim işlevini nicel olarak ortaya koyabilir. Hitit, Lidya ve Urartu gibi Anadolu uygarlıklarının motiflerini de kapsayan karşılaştırmalı bir göstergebilimsel çalışma, bölgesel tasarım kimliğinin daha geniş bir çerçevede ele alınmasına olanak tanıyacaktır. Çağdaş tasarım koleksiyonunun müze mağazaları, turizm noktaları ve uluslararası tasarım fuarlarında sergilenmesi, Frig kültürünün geçmişten günümüze uzanan köprü işlevini görünür kılacaktır. Böylelikle Anadolu'nun kadim kültürel mirası geniş kitlelere aktarılabilir.

KAYNAKÇA

- Çeken, B., & Asuman, A. (2016). İmgelerin Göstergebilimsel Çözümlemesi “Film Afişi Örneği”. Bayburt Eğitim Fakültesi Dergisi, 508-517.
- Akıncı, K. (2023, 5 20). İnsanlık Tarihindeki İlk Sanat Eserleri: Prehistorik Mağara Resimleri. ResearchGate.:
https://www.researchgate.net/publication/370924598_INSANLIK_TARIHINDEKI_ILK_SANAT_ESERLERI_PREHISTORIK_MAGARA_RESIMLERI_THE_FIRST_WORKS_OF_ART_IN_HUMAN_HISTORY_PREHISTORIC_CAVE_PAINTINGS adresinden alındı
- Akkaya, A., Arıöz, Ö., Olgun, R., Koyuncu, M., Çoban, H., & Kuru, H. (2021). Frig medeniyeti ve Tarihi. (M. Aslan, Dü.) Afyonkarahisar, İhsaniye, Türkiye: İhsaniye Kaymakamlığı ve İhsaniye İlçe Millî Eğitim Müdürlüğü.
- Büyükyıldırım, O. (2021, 01 10). Arkeonews. Özgürlük Sembolü Frig Şapkası’nın Türkiye’den Kolombiya’ya Yolculuğunun Hikayesi: <https://arkeonews.com/ozgurluk-sembolu-frig-sapkasinin-turkiyeden-kolombiyaya-yolculugunun-hikayesi/> adresinden alındı
- İlhan, G. (2013, 29 01). Üçgen / Triangle. Mitoloji ve Sembolizm:
<http://www.mitolojivesembolizm.com/triangle.htm#:~:text=%C3%9C%C3%A7gen%20kimi%20k%C3%BClt%C3%BCrlerde%20insan%20kalbinin%20ve%20ana%20rahminin%20sembol%C3%BC%20olarak%20kabul%20edilmi%C5%9F%20bir%20%C5%9Fekildir.> adresinden alındı
- Köerte, G., & Köerte, A. (1904). Gordion: Ergebnisse der Ausgrabung im Jahre 1900. Berlin: Jahrbuch des Kaiserlich Deutschen Archäologischen Instituts.
- Köroğlu, H. (1996). Frigler'de Hayat Ağacı İnancı. Atatürk Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Arkeoloji ve Sanat Tarihi Ana Bilim Dalı.
- Kızıllı, S. (2020). FRİG GEOMETRİK BEZEMELİ SERAMİK KÜLTÜRÜNÜN KÖKENİ ÜZERİNE DÜŞÜNCELER. AYDIN ADNAN MENDERES ÜNİVERSİTESİ SOSYAL BİLİMLER ENSTİTÜSÜ ARKEOLOJİ ANABİLİM DALI.
- Kaptan, S., & Sayın, Z. (2010). Grafik tasarım bağlamında iletinin görsel tasarımlara dönüştürülmesi. İdil, 806-820.
- Kozak Akoğlu, M., & Çiçek, D. (2022, 5 2). Friglerin Kullandıkları Mitolojik Unsurların Bölge Turizmine Yansımaları. GSI Journals Serie A: Advancements in Tourism, Recreation and Sports Sciences, 255-268.
- Mead, G. H. (1907). The social settlement: Its basis and function. University of Chicago Record, 12(4), 108-114.
- Parlak, D., & Şekerci, H. (2021). Frig Dönemi Mutfak Eşya Formlarının Sofra Seramikleri Türünde Endüstriyel Uygulamaları. İMÜ Sanat Tasarım ve Mimarlık Fakültesi Dergisi, 7(2), 322-339.

- Parsa, A. F. (2004). İmgenin Gücü ve Görsel Kültürün Yükselişi. Fotoğrafya: <https://www.fotografya.gen.tr/TR,1704/imgenin-gucu-ve-gorsel-kulturun-yukselisi.html> adresinden alındı
- Roller, L. (2004). Ana Tanrıça'nın İzinde Anadolu Kybele Kültü. İstanbul: Homer Kitabevi.
- UNESCO. (2015). UNESCO Dünya Mirası Listesi. Unesco: <https://www.unesco.org.tr/Pages/125/122/UNESCO-D%C3%BCnya-Miras%C4%B1-Listesi> adresinden alındı
- Uslu Azarak, L., & Yariş, S. (2026). Meander: Sonsuz çizginin tarihsel ve sanatsal değerlendirilmesi. Anasay, 218-239.
- Uyan Dur, B. İ. (2015). Türk görsel iletişim tasarımı ve kültürel değerlerle bağları. The Turkish Online Journal of Design, Art and Communication, 5(1), 443-453.
- Worrel, A. (2024, 4 7). Exploring the Zigzag Pattern:History Evolution and Purpose in Furniture Design. House of Jaipur: https://www.houseofjaipur.co/post/exploring-the-zigzag-pattern-history-evolution-and-purpose-in-furniture-design?srltid=AfmBOoqo0mwK7pt9lTyQ9vIRzHZH1qb7NpE7nwzhcq_WfMfKIOv_d8KV adresinden alındı
- Yıldız, E. (2024, 05 02). Şirinler: Tarihçe ve Etkileri. Prezi: <https://prezi.com/p/zv7wmt5mzz0i/sirinler-tarihce-ve-etkileri/> adresinden alındı
- Yılmaz, B. (2008). İlkçağ Anadolu uygarlıklarında sosyo-ekonomik ve kültürel yapı bağlamında kütüphane/arşiv kurumu. Türk Kütüphaneciliği, 22(3), 351-376.
- Yaban, N. T. (2012). Sanat ve Görsel İletişimin Buluşma Noktası: Ekslibris. Batman Üniversitesi Yaşam Bilimleri Dergisi, 1(1), 973-984.
- Yasa, S. (2013). Grafik Tasarımda İletişim ve Göstergebilim. İnönü Üniversitesi Sanat ve Tasarım Dergisi, 2(5), 123-134.

Kassam Tugayları Sözcüsü Ebu Ubeyde'nin Demeçlerinde Tenas ve Retorik İnceleme

Rabia YILMAZ

E-mail: rbyilmaz0@gmail.com ; Selçuk Üniversitesi, Edebiyat Fakültesi, Arap Dili ve Edebiyatı Bölümü, Konya/ Türkiye.

Özet

İnsanlık, tarihi boyunca, tarafları mazlum ve zalim olan bir mücadele içerisinde var olma savaşını vermiştir. Bu savaşlarda kelimeler, kimi zaman bir silahtan daha etkili olmuştur. Bu bağlamda Filistin, kelimelerin de en az silahlar kadar etkili olduğu bir savaş olarak göze çarpmaktadır. 7 Ekim 2023'te başlamış olan savaşta İzzeddin el-Kassam Sözcüsü Şehit Ebu Ubeyde'nin etkileyici hitabetinden oluşan demeçleri, savaşın en etkili silahlarından birisi olmuştur. Bununla birlikte Ebu Ubeyde'nin demeçleri, retorik ve tenasın yoğun olarak kullanıldığı bir sanat haline gelmiştir. Bu çalışma temel olarak iki ana bölüme ayrılmıştır. Birinci bölümde, Ebu Ubeyde'nin hayatı ve eserleri incelenmiş, ikinci bölümde ise demeçlerindeki tenas ve retorik unsurları ele alınmıştır. Tüm bunlarla birlikte konunun Türkiye'de bilimsel açıdan daha önce incelenmemiş oluşu, tenas ve retorik gibi olguların hitabet özelinde ele alınmış olması, çalışmayı araştırmacı ve okuyucular nezdinde ilgili çekici kılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Ebu Ubeyde, Filistin, Retorik, Tenas

Abstract

Throughout history, humanity has fought for its very existence in a struggle between the oppressed and the oppressors. Words have sometimes been more effective than weapons. The Palestinian conflict stands out as a war in which words are just as effective as weapons. In the war the statements by al-Qassam spokesperson Abu Ubaidah- known for his powerful oratory- have become one of the war's most effective weapons. This study is essentially divided into two main sections. In the first section, the life and works of Abu Ubaidah are examined, while the second section focuses on the intertextuality and rhetorical elements in his statements. In addition to all this, the fact that the subject has not previously been examined from a scientific perspective in Turkey, and that phenomena such

as intertextuality and rhetoric have been addressed specifically in the context of oratory, has made this study particularly appealing to researchers alike.

Keywords: Abu Ubaidah, Palestine, Rhetoric, İntertextuality

GİRİŞ

Filistin coğrafyası, insanlık tarihi boyunca önemli bir coğrafi konum olmuş ve bu süre zarfında insanlığın gündeminde yer almıştır. Jeopolitik konumu dolayısıyla Ortadoğu'nun merkezinde olup tüm sorun ve çözümlerin üzerinden yürütülmek zorunda kalındığı bir konumdadır. Semavi dinlerin kesişim noktasında olması ve “Arz-ı Mukaddes” oluşu bu bölgenin merkezi konuma gelmesinde önemli bir rol oynamıştır. Bölge MÖ. 722 yılından itibaren, Babil, Pers, Grek ve Roma istilalarına maruz kalmış, 637 yılında Hz. Ömer'in Kudüs'ü fethi ile halkı din değiştirmiş ve bölge, Müslüman-Arap hakimiyetine girmiştir. Ardından 1090 yıllarında haçlı seferleri ile tekrar büyük bir kargaşa yaşanan Filistin'de 1187 yılında Selahaddin Eyyubi'nin Kudüs'ü fethi ile 1917'ye kadar Müslümanların hakimiyeti altında kalmıştır. Asırlar süren Osmanlı hakimiyeti ve öncesinde Müslümanların hakimiyetinde oluşu bölgeyi sıradan bir toprak parçası olmaktan çıkarıp, İslam ümmetinin ortak mirası ve hafızası haline getirmiştir. (Tosun, 2024, s. 208) Ardından Birinci Dünya Savaşı'ndan sonra Osmanlı'nın bölgeden çekilmesi ile bölgede bir otorite kavgası oluşmuş ve bu kavga yerini İngilizlerin sömürgeci yapısına bırakmıştır. İngiliz Mandası'nın bölgeye gelişi Filistinliler için sadece bir yönetim değişikliği değil, bugün 1948'de yada 2023'te başladığı zannedilen, yerlerinden edilip vatansızlaştırma sürecinin asıl başlangıç noktası olmuştur. İngiliz Mandası, bölgede söz sahibi olmasıyla birlikte asırlarca süren Osmanlı hakimiyetinde, bölgeden toprak istekleri reddedilen Yahudilere toprak vermiştir. Ve böylece Yahudilerin devlet kurma gaye ve hayalleri için somut ilk adım atılmış ve 1948'de resmi olarak İsrail Devleti kurulmuştur. Sınırları kabul etmeyip karşı gelen Arap Devletler 1948-1949-1956-1967 ve 1973 yıllarında İsrail'e karşı savaş açmış fakat savaşlar mağlubiyet ile sonuçlanmış ve kendi ülkelerinden de toprak kaybetmelerine neden olmuştur. (Kenar ve Sehweil, 2025)

İsrail Devleti'nin kuruluşundan bugüne kadar zulüm ve şiddet ile yerlerinden edilen Filistin halkı, buna karşı fiziki bir tepki olarak 1987'de Hamas “Harakat al-Muqawama al-İslamiya” adıyla siyasal ve İslami direniş hareketi olarak kurumsal ve ideolojik yapısı Müslüman Kardeşler Teşkilatı'na uzanan yapıyı kurmuştur. (Ahnas, 2025a, s. 111)

“Hamas, kapsamlı, İslami, ulusal, cihatçı ve siyasi bir harekettir. Sosyal ve kültürel çıkarları vardır. İnsanlara hizmet eder ve kurumlar inşa eder. Tamamen dini bir hareket veya tamamen siyasi veya saf bir askeri hareket değil, yalnızca askeri bir kanat veya askeri bir hizip değil ve yalnızca dini, sosyal veya politik bir hareket değil daha çok bunların bir karışımıdır.” (Meşal, 2008, s. 68)

Kuruluşundan itibaren 1990'a kadar grevler ve protesto gösterileri ile eylemler yapan Hamas, 1990'da İsrail tarafından Filistin'de yapılan bir katliam sonucunda İzzeddin el-Kassam Tugayları adıyla askeri kanadını resmi olarak oluşturmuştur. (Ahnas, 2025b, s. 121) Adını 1930'larda İngiliz sömürgeciliğine başkaldırmasıyla bilinen İzzeddin el-Kassam'dan alan Kassam Tugayları bugün büyük ölçüde dünyanın

en büyük açık hava cezaevi haline dönüşen Gazze’de direniş göstermektedir. Modern saldırı ve savunma sanayiini geliştiren Kassam Tugayları gelişmiş tünel ağları ve yerel roket sistemleri, komutan asker ve sözcü birlikleriyle profesyonel bir yapıya dönüşmüştür. Bu yapının dış dünyaya açılan yüzü, özellikle 7 Ekim 2023 Aksa Tufanı sonrasında ekranlarda çokça gördüğümüz ve bugün şehit olarak zikrettiğimiz İzzeddin el-Kassam resmi sözcüsü Ebu Ubeyde olmuştur. Geçmişin hafızasını günümüzdeki modern oluşumlarla destekleyerek bu yeni yapıya dönüşen Kassam Tugayları, bize, bu direnişin bugün başlamayıp atadan oğula, milletten millete, nesilden nesile geçen bir miras olduğunu göstermektedir.

Bu çalışmada, geçmişten günümüze gelen bu mirasın sadece fiziki bir eylem olarak değil, kelimler, sloganlar, inanış ve sözlerle de devam etmesini sağlamış olan dil hafızasının, Ebu Ubeyde’nin hitabetinde klasik söylemden çıkarak, demeçlerinde iktibas sanatı ve retorik öğelerin modern bir tenas (metinlerarasılık) stratejisiyle harmanlanarak kullanılması konusu incelenecektir.

Araştırmada, birincil kaynak olarak “*Ebû Ubeyde’nin Demeçlerinde Referans Aldığı Hadisler ve Hz. Peygamber (s.a.v.) Vurgusu*” (Yıldırım, 2024, ss. 115-130), “*‘Kuvvetu’l-fi’li’l-keîâm fi’l-‘hiîâbi’s-siyâsî ledâ el-Muîâvemetil-Filîşîniyye*” (Alâhim ve İbn Süleyman, 2024), “*‘Âliyâtü’l-İîknâ’ fî ‘Hıîâbâti’l-Mütehaddîş li-Ketâ’ibi’l-Kassââm (Ebî ‘Ubeyde) Muîârebe Tedâvüliyye*” (Sâbir, 2024), *et-Tenâşu enmâîuhu ve envâ’uhu fî şî’ri’l Mütnebbî (Dabbağ, 2021)* eserleri temel alınmıştır. Tüm bunlarla birlikte çalışma, Ebu Ubeyde’nin demeçlerinde bulunan tenas ifadeleri ve retorik söylemlerin incelenmesiyle sınırlandırılmıştır. Araştırma, nitel araştırma yöntemine dayalı metin merkezli bir çözümleme yaklaşımıyla incelenmiş olup ilgili çalışma ele alınırken, Ebu Ubeyde’nin, 10.07.2023-18.07.2025 tarihleri arasında Kassam Tugayları Resmi Sözcüsü olarak vermiş olduğu demeçler merkeze alınmıştır.

Bu çalışmada Kassam Tugayları Resmi Sözcüsü Ebu Ubeyde’nin hayatı ve eserleri tanıtıldıktan sonra kendisinin hitabeti üzerinden tenas konusu ele alınmıştır. Bu konu özelinde Ebu Ubeyde’nin Türkiye’de bilimsel yönleriyle ele alınmamış ve hitabeti bağlamında incelenmemiş olması bu çalışmayı araştırmacılar ve okuyucular nezdinde değerli kılmaktadır.

İzzeddin el-Kassam Tugayları Resmi Sözcüsü Şehit Ebu Ubeyde

1. Hayatı ve Eserleri

Vefatına kadar Ebu Ubeyde olarak tanınmış olan Huzeyfe Samir el-Kahlut, sözcüsü olduğu Kassam Tugaylarının güvenlik kaynaklı gizlilik stratejisi nedeniyle, hem küresel çapta bu kadar tanınmış olup hem de hakkında çok az şey bilinen nadir isimlerden biri olmuştur. Hayatına dair detayların gün geçtikçe yavaş yavaş ortaya çıkması ise onu tanıyan ailesi, çevresi ve sözcüsü olduğu Kassam Tugayları tarafından daha çok sosyal medya üzerinden yapmış oldukları paylaşımlar ile ortaya çıkmaktadır. Bu bağlamda, kendisi hakkında yapılan bilimsel araştırmaların kısıtlı oluşu, hayatını hakkındaki detaylar konusunda bizi kısıtlamaktadır. Çalışmanın bu bölümünde yer alan “Hayatı” başlığında, bu paylaşımların toplanıp bir bütün haline getirildiği elektronik ve çevrimiçi kaynaklar kullanılmıştır.

Huzeyfe Samir el-Kahlut, 1985 yılında Cıbaliye Kampı’nda doğmuştur. Ailesi 1948’de gerçekleşen Nekbe’den sonra Filistin’in güneybatısında yer alan Majdal (bugünkü adıyla Aşkelon) şehrinden bu kampa göç etmek zorunda kalmıştır. Huzeyfe Samir el-Kahlut bu kampta büyümüş ve yetişmiştir. Temel

eğitimini bölgede bulunan Birleşmiş Milletler Yakın Doğu'daki Filistinli Mültecilere Yardım ve Bayındırlık Ajansı (UNRWA) okullarında almış ve 2002 yılında liseden üstün başarı ile mezun olmuştur. Özellikle lise döneminde Hamas'ın öğrenci kollarında aktif bir rol oynamıştır. Üniversite eğitimine Mühendislik Fakültesinde başlamış fakat daha sonra bu bölümü bırakıp eğitimine Gazze İslam Üniversitesinde Usulüddin Fakültesi İslami İlimler / Şer'i Araştırmalar bölümünde devam etmiş ve aynı alanda yüksek lisans programını da tamamlamıştır. Yüksek Lisans tezi olan "Yahudilik, Hristiyanlık ve İslam'da Kutsal Topraklar" başlıklı çalışması, mücadelesini sadece sahada değil, akademide de canlı tuttuğunun bir simgesi olmuş ve özellikle vefatından sonra büyük bir yankı uyandırmıştır. (el-'Aklük, t.y.; "'Hamās' tekşif veche 'Ebū 'Ubeyde'.. Hāzihi qıṣṣat Huzeyfe Semīr 'Abd Allāh el-Kahlūt", 2025; "Huzeyfe el-Kahlūt.. Ebū 'Ubeyde el-Evvel en-Nāṭıḳ bi-ismi'l-Ḳassām", t.y.; "Şaqıq Ebū 'Ubeyde yekşif 'an melāmiḥ min tefāşili ḥayātih", t.y.)

2000 yılında 2. İntifada'nın başlamasıyla saha ve medya görevleri ile Hamas direnişinin saflarında yerini almaya başlayan el-Kahlut, ilk olarak 2002 ve 2003 yıllarında ekranlarda görünmüş olsa da 2004 yılında Gazze'de bulunan el-Noor Camii önünde savaşın gidişatı hakkında bilgi vermek üzere düzenlemiş olduğu basın toplantısı ile dikkatleri üzerine çekmiştir. Bundan sonraki Hamas'ın düzenlemiş olduğu tüm operasyon ve savaşlarda medyadaki aktif raporlamaları ve bu raporlamalarındaki üslup ve hitabet başarısı ile her savaşta dikkatleri üzerine çekmeyi başarmıştır. İsrail'in başlangıçta görmezden geldiği Ebu Ubeyde, zamanla popülaritesinin hızla artmasıyla birlikte, İsrail medyası tarafından da açıklamalarının hızla çevrildiği ve medyada yürüttüğü psikolojik savaş nedeniyle de en büyük hedef halinde gelmiştir. (el-'Aklük, t.y.; "'Hamās' tekşif veche 'Ebū 'Ubeyde'.. Hāzihi qıṣṣat Huzeyfe Semīr 'Abd Allāh el-Kahlūt", 2025; "Huzeyfe el-Kahlūt.. Ebū 'Ubeyde el-Evvel en-Nāṭıḳ bi-ismi'l-Ḳassām", t.y.; "Şaqıq Ebū 'Ubeyde yekşif 'an melāmiḥ min tefāşili ḥayātih", t.y.)

Kırmızı bir kefiye ile yüzünü kapatmış ve tehditkâr bir ifade ile işaret parmağını kaldırmasıyla bilinen Ebu Ubeyde, kendisine takılan "maskeli" unvanı ile direnişin şarkı ve şiirlerine konu olmuştur. Eşi ve 4 çocuğu ile savaşın tüm sıkıntılarını çekmiş ve bu savaş esnasında halkın yaşadığı tüm acıları yaşamış olan Ebu Ubeyde, askeri kimliğinin dışında eşi ve çocuklarına daima Kur'an-ı Kerim ile yaşamak konusunda nasihatlerde bulunmuş ve kendisi de Kur'an ve ailesi arasında bir hayat sürmüştür. Eşi İsra Jabr, gazetecilik ve medya alanında üniversite eğitimini almış ve eşi ile aynı davada çalışmıştır. Çocuklarını daima çalışmaya sevk etmişler, Kur'an hafızı olmaları konusunda teşvikte bulunmuşlardır. En büyük oğlu İbrahim'in zorlu savaş döneminde elde ettiği lise başarısı, kendilerinin eğitime vermiş oldukları değer de bir simgesi olmuştur. En büyük çocukları olan İbrahim ile künyelenmiş olan Ebu Ubeyde, askeri kimliği dışında, halk arasında ve çevresi tarafından Ebu İbrahim olarak tanınmaktaydı. (el-'Aklük, t.y.; "'Hamās' tekşif veche 'Ebū 'Ubeyde'.. Hāzihi qıṣṣat Huzeyfe Semīr 'Abd Allāh el-Kahlūt", 2025; "Huzeyfe el-Kahlūt.. Ebū 'Ubeyde el-Evvel en-Nāṭıḳ bi-ismi'l-Ḳassām", t.y.; "Şaqıq Ebū 'Ubeyde yekşif 'an melāmiḥ min tefāşili ḥayātih", t.y.)

Ağustos 2025'te İsrail istihbaratının düzenlemiş olduğu hava saldırısı ile şehit olan Ebu Ubeyde, eşi ve 3 çocuğunun kimliği Kassam Tugayları tarafından ilk defa 29 Aralık 2025'te resmi olarak ilan edilmiştir. (el-'Aklük, t.y.; "'Hamās' tekşif veche 'Ebū 'Ubeyde'.. Hāzihi qıṣṣat Huzeyfe Semīr 'Abd Allāh el-Kahlūt", 2025; "Huzeyfe el-Kahlūt.. Ebū 'Ubeyde el-Evvel en-Nāṭıḳ bi-ismi'l-Ḳassām", t.y.; "Şaqıq Ebū 'Ubeyde yekşif 'an melāmiḥ min tefāşili ḥayātih", t.y.)

Huzeyfe Samir el-Kahlut'un yaşadığı dönemde yazmış olduğu yüksek lisans tezi, kendisinden sonra gelenlere yazılı olarak bıraktığı tek eser olmuştur. *el- 'Arđü'l-Muğaddese Beyne'l-Yehüdiyye ve'n-Naşrâniyye ve'l-İslâm* (Yahudilik, Hristiyanlık ve İslam'da Kutsal Topraklar) (el-Kahlut, 2013) adlı tezi, bu alandaki ilgi ve başarısını temsil eden bir eser haline gelmiştir. Vefatından sonra ortaya çıkan ve farklı dillere çevrilmeye başlanan tez, Türkiye'de de her üç dini ayrı ayrı ele alan üç farklı kitap halinde basılmıştır. Huzeyfe Samir, tezini 2013 yılında Gazze Üniversitesi'nde tamamlamıştır. Tezindeki temel amaç karşılaştırmalı olarak üç semavi din olan Yahudilik, Hristiyanlık ve İslam'da Filistin topraklarının önemi, değeri ve kutsallığını ispatlamaktır. El-Kahlut, tezinde Filistin'in sadece siyasi bir anlaşmazlık değil, dini bir mücadele olduğunu savunur. Çalışmasını gelecek nesiller için de bir ders aracı olarak planlayan el-Kahlut, Filistin ekseninde dönen bu savaşların dini arka planını tahlil edip ortaya koymaktadır. Çalışmasında, her üç dinin de Filistin bölgesine yüklemiş olduğu kutsiyeti ve sebeplerini ayrı bölümlerde ele almıştır. Temelde her üç dinin de asıl kaynakları olan Kur'an, Tevrat ve İncil'i kullanmıştır. Yahudiliğin kutsiyetinin vadedilmiş topraklar inancından gelmiş olduğunu ve bu inancın bugün getirisi olarak bugünkü Siyonizm'in ortaya çıkması ve bu ortaya çıkışın da illegal yerleşimci ve Filistin halkına karşı olan katliamı getirdiğini iddia etmiştir. Hristiyanlıkta da bu toprakların Haçlı seferlerinin onlar için önemi ve dini temellerini ortaya koyarak bugünkü önemin tarihini ele almaktadır. İslam'da ise İsrâ ve Miraç mucizesi, ilk kible oluşu ve bu toprakların büyük bir kıyamet savaşı ile tekrar geri alınacağı inancının günümüzdeki yansımalarını ele almıştır. (el-Kahlut, 2013)

1.1. Yaşadığı Dönem

Huzeyfe Samir el-Kahlut'un yaşadığı dönem, kendisinin ve kendisiyle birlikte bugün Filistin halkının hayatını kökten etkileyen bir dönüm noktası olan 1947'de yaşanan Nekbe felaketi ile başlatılabilmektedir. Nekbe sırasında henüz hayata gelmemiş olsa da hayatına yön veren en önemli olay olarak görülmektedir. Gazze'nin doğusunda bulunan Cibaliye Mülteci Kampı, Nekbe sonrasında Birleşmiş Milletler tarafından kurulan bir kamp olup, yaklaşık 100.000 kadar nüfusuyla, en kalabalık bölgelerden biri haline gelmiştir. İlk etapta geçici olarak kurulan kamp, daha sonrasında nüfusa oranla yerleşim, çadır ve barakaların artmasıyla halen süregelen bir yerleşim bölgesi olmaya devam etmektedir. Kahlut'un, bu kampta dünyaya gelmesinin, kendisine siyasi, sosyal ve kültürel açılardan birçok etkisi olmuştur. (Ekin, 2025)

1.1.1. Siyasi Etkisi

1987 yılında, çocukluk döneminde gerçekleşmiş olan Birinci İntifada, kendisinin hayat çizgisini belirleyen en önemli aktör olmuştur. Bu dönemde Hamas'ın (İslami Direniş Hareketi) kurulmuş olup yönetime geçmesi, Gazze'de daha önce yönetimde olan Filistin Kurtuluş Örgütü'nün (FKÖ) milliyetçi ve toprak kazanım politikalarını İslami bir eksene yöneltmiştir. 2005 yılına kadar İsrail'in bölgede oluşuyla aktif bir çatışma sürdüren Hamas, aynı yılda İsrail'in Gazze'den çekilmesiyle bölgede çalışmalarını daha aktif hale getirmiş ve 2006'da bölgeye olan hakimiyetini seçimlerdeki oy çokluğuyla resmi olarak da kanıtlamıştır. Seçimlerden sonra iç savaşın devam etmesi ve Gazze'nin bir açık hava hapishanesi oluşu sebebiyle Hamas Gazze'yi yönetmiş ve Batı Şeria ise Mahmud Abbas liderliğinde Filistin Yönetimi tarafından yönetilmeye devam etmiştir. 2006 yılında Gilat Şalit isimli İsrailli askerin başarılı bir istihbarat operasyonu ile esir alınması, Hamas yönetiminin ilk büyük başarılarından biri

olmuştur. (Tamimi, 2007, ss. 187-207) Huzeyfe Samir el-Kahlut bu yıllarda üniversite mezuniyetinin ardından sözü geçen operasyonu medya yoluyla tüm dünyaya ilan ederek ilk resmi sözcülük görevini büyük bir başarıyla yerine getirmiştir. Hamas'ın kontrolü tamamen ele almış olması ile bölgeye uygulanan ambargo şiddetini arttırmış ve bu süre zarfında Ebu Ubeyde lakabıyla tanıdığımız el-Kahlut, tüm dünyaya küçük ve mahrumiyet bölgesi olmasına rağmen Gazze'nin 2008, 2012, 2014 ve 2021 yıllarında yaşanan savaşlarda Kassam Tugaylarının yürüttüğü askeri ve siyasi başarıyı medya aracılığıyla dış dünyaya duyurarak, aynı zamanda bir psikolojik savaş da yürütmüş ve başarılı olmuştur. Başarısı, 7 Ekim 2023'te tekrar eden savaş ile tekrardan gün yüzüne çıkarak, dünyayı kendisine hayran bırakmıştır. (Ekin, 2025, ss. 393-394)

1.1.2. Sosyal Etkisi

el-Kahlut'un yerinden edilmiş bir ailenin çocuğu olarak bir kampta hayatına başlaması, onu sosyal yaşamında en fazla etkileyen unsurlardan biri olmuştur. Birleşmiş Milletlerin kamp alanında açmış olduğu UNRWA okullarında eğitimini almış olan Kahlut, kamptaki diğer tüm çocuklar gibi, tekrardan asıl evlerine dönme arzusuyla yetiştirilmiş. Hayatını küçük yaşlardan itibaren cami ekseninde devam ettirmiştir. Yaşadığı bölgedeki diğer çocuklar gibi, oyun oynamak ve bir işgalciye taş atmak arasında bir fark görmeyen bu dönem neslinden olan Kahlut, okuldaki akademik başarısı ile de gözleri üzerine çekmiştir. O dönemde Gazze'nin camileri, toplum için sadece bir ibadet alanı değil, aynı zamanda eğitimin, sosyallığın ve siyasi tartışmaların merkezi haline gelmiştir. Bu da ileride resmi sözcülük görevini üstlenecek olan Kahlut'un gündelik hayatının çoğunu burada geçirmesinin sebeplerinden biridir. Kassam Tugaylarının yapısı itibarıyla hem yeraltında hem de yerüstünde var olan hayatı sözcü olduğu dönemde Kahlut'un ailesinden ve sevdiklerinden dönemsel olarak uzaklaşmasına sebep olsa da almış olduğu eğitim ve İslami terbiyeyi, 4 çocuğu ve ailesine vermiş ve onların da aynı bilince sahip olmasını sağlamıştır. (osaid.sameer.2003, 2026)

1.1.3. Kültürel Etkisi

Gazze, Ebu Ubeyde döneminde, Filistin halkının, işgale karşı elinden gelen her şeyle fiziki olarak savaştığı gibi, kendi kültürünü de İsrail'in işgaline karşı kullandığı en büyük silah ve aynı zamanda siper haline getirmiştir. Çalışmanın ana konusu olan hitabetin bir silah olarak kullanılmasının yanında eğitim, kıyafet ve yemekler bunun bir parçası olmuştur. Küçük bir bölgede kendi varlığını korumaya çalışan Gazze halkı nesilleri için de bu çabayı sürdürmüş ve geçmişten aldığı kültürü geleceğe daha güçlü bir şekilde aktaran bir köprü olmuştur. Bu kültürel davanın en büyük örneklerinden biri de Ebu Ubeyde'nin kullanmış olduğu kırmızı kefiyedir. Daha çok bölgenin yaşlı ve yerli kesiminin giymiş olduğu, aynı zamanda 1993 yılında şehit edilmiş olan eski Kassam lideri İmad Aklî'nin de kullanmış olduğu ve direnişin ve gizliliğin bir sembolü haline gelen kırmızı kefiye, medyada Ebu Ubeyde'nin yüzünü kapatırken, aynı zamana Gazze sokaklarında direnen çocukların da yüzünü kapatan kültürel bir imge haline gelmiştir. Bunun dışında 2007 sonrasında uygulanan şiddetli ambargo döneminde halkın dışardan gelen gıdaya ihtiyacı olmadığını iddia etmesi ve kendi topraklarında yetişen zeytin, zahter, karpuz, portakal gibi yiyeceklerle idare etmeleri bugün, bu yiyeceklerin, bölgenin kültürel sembollerinden biri haline gelmesinin nedenlerinden biri olmuştur. (Atatanır ve Snoubar, 2025, s. 248)

İzzeddin el-Kassam Tugayları Resmi Sözcüsü Ebu Ubeyde'nin Demeçlerinde Tenas ve Retorik Kodlar

2. Tenas

Tenas (metinlerarasılık), temel olarak Mihail Bahtin'in metinlerin aslında birbirleriyle konuştuğunu işaret eden “diyalogculuk” düşüncesini ele alarak, 1960 yıllarında Julia Kristeva'nın hiçbir metnin birbirinden bağımsız olmadığı savı ile ortaya koyduğu bir terimdir. Hem batı edebiyatında hem de doğu edebiyatında hızlı bir şekilde yayılan bu terim, teknik olarak 60'lı yıllarda ortaya çıkmış olsa da tarih boyunca çeşitli edebiyat parçalarında kullanılmış bir terimdir. (Bulut, 2018)

Tenas, bir metnin başka metinlerle olan ilişkisini ele alan bir edebiyat kavramıdır. Bir metnin başka bir metne gönderme yapması, başka bir metni dönüştürmesi veya yeniden yorumlaması anlamlarına gelmektedir. Tenasın kullanıldığı metinlerde, metin ile okuyucuyu birbirine bağlanarak daha aktif bir okuyucu portresine olanak sağlanmaktadır. Dolayısıyla tenasın başarısı yazara bağlı olduğu kadar metni okuyan okuyucunun anlayışına da bağlıdır. Yazar, tenası, genellikle ya bir amaca yönelik olmak suretiyle bilinçli bir şekilde kullanır ya da ortak bir geçmiş ve kültürden gelen bir bilinçle plansız bir şekilde metinlerine yansıtmaktadır. (Bulut, 2018, s. 8)

2.1.Tenas, İktibas ve Telmih

Tenas, genel olarak iktibas ve telmih sanatlarına içine alan bir üst terim olarak kaşımıza çıkmaktadır. Metinler arasında bir bağ kurma amacıyla ortaya çıkan tenas kavramı içerisinde iktibas ve telmihi de barındırmaktadır.

İktibas, sözlükte “ateş közü, hayır, ilim istemek” anlamlarına gelmektedir. Edebiyatta ise iktibas sanatını, Kur'an-ı Kerim, hadis-i şerif, tanınmış şairlerin şiirleri, sözleri veya atasözlerinden yazılan metne alıntı yapılmasıdır. Tam iktibas ve nâkıs iktibas olarak iki şekilde iktibas yapılabilir. İktibasta dikkat edilmesi gereken şeylerden biri, alıntı yapılırken, “Allah şöyle buyurdu” gibi bir başlangıcın olamaması gerekmesidir. (Kara, 2021)

Telmih, sözlükte “hatırlatma sanatı, anıştırma” anlamlarına gelmektedir. Halk arasında bilinen bir olay, vakıa ya da hikâyeye doğrudan değil, dolaylı yoldan söz arasında bir işaretle bulunmak demektir. (Öksüz, 2015)

2.2.Melez (Hibrit) Söylemde Tenas

Tenas, aslı itibarıyla disiplinlerarası bir kavramdır. Farklı disiplinlerden çağrışım yaparak ve alıntılarla kullanılmaktadır. (Ekiz, 2007) Bu disiplinlerin harmanlanarak tek bir söylemde zikredilmesi ve bunun tenas ile yapılmasını, edebiyatta “melez söylemde tenas” olarak zikredilmesi, Cemaleddin bin Süleyman ve Huriye Alâhim tarafından yapılan çalışmada ilk defa ortaya atılmıştır.

"Ebu Ubeyde'nin konuşmalarını “melez söylem” (el-hitâbu'l-hecîn) olarak adlandırabiliriz. Melezlikten kastımız; birden fazla söylemin tek bir söylem içinde birleştiği, birbiriyle iç içe geçtiği ve kaynaştığı bir söylemdir. Bu durum, söz konusu söylemin “etkisöz” (illocutionary) gücünü daha da artırmaktadır. Zira

bu söylem; din, siyaset, hukuk, bilim, eylem, askerlik ve medyayı kendi potasında birleştiren bir sentezdir."(Ekiz, 2007, s. 225)

2.3.Tenasın Amacı ve Stratejik İşlevleri

Tenas, temelde, geçmişle bugünle, kültürü bir başka kültürle, tarihi bir başka tarihle, yazarı okurla, okuru da zihin dünyasıyla bağlamaya yarayan bir köprü görevi görmektedir. Metni, sabit ve durgun bir halden, canlı bir mekanizmaya çevirme aracı olarak kullanılmaktadır. Tenası yazar, metin ve okur merkezli katkı olmak üzere 3 başlıkta incelemek mümkündür. (Ekiz, 2007, s. 10)

Yazar merkezli katkılar, yazarın metnin içerisine bilinçli olarak yerleştirmiş olduğu ifadeleri kapsamaktadır. Bu bazen ilerleyemediği durumda yazara yeni bir yorum katma fırsatı verirken, bazen de sözlerini temellendirip ispatlanması kolay hale getirmek için kullanılmaktadır. Metin merkezli katkılar ise, metnin meşruiyetini geçmişle bağlayarak arttırırken ve metni bugün yaşayan, yarın da yaşayacak bir varlık haline getirmektedir. Metin merkezli katkılar yine yazar genellikle bilinçli olarak yerleştirilen ifade ve metinlerdir. Okur merkezli katkı ise yazarın fark etmeden bilinçsiz olarak kendi kültür ve toplumdaki kolektif hafızanın getirisi sonucunda kullanmış olduğu ifade ve fikirlerin, okur tarafından, okurun geçmişi, bilgisi, kültürü ve zihin dünyasını yansıtacak şekilde yorumlanıp anlaşılması ile ortaya çıkan tenas unsurlarıdır. (Ekiz, 2007)

Bu katkılar sonucunda tenasın stratejik olarak kullanıldığı metinlerin birçok amaca hizmet etmesi mümkündür. Kullanıldığı metinlerde, genel olarak bir meşruiyet kazandıran tenas, tarihi ve kutsal kaynaklardan alınan ifadeler ile bu meşruiyeti kalıcı ve ikna edici hale getirmektedir. Dolayısıyla bir hitabet esnasında örneğin dini bir kaynaktan bir alıntı yapılması, dinleyicileri ikna etme konusunda etkili bir unsur olarak kullanılmaktadır. Aynı zamanda geçmişten yapılan bir alıntı dinleyici ve okuyucuya söylenen şeyin yeni ortaya çıkmadığını aksine, tarihi bir devamlılığının oluşu mesajını vermektedir. Bununla birlikte tenasın özellikle konuşmacı yada yazar tarafından bilinçli kullanıldığı bir senaryoda dinleyiciyi manipüle edecek detaylara yer vermesi de mümkündür. Bu da konuşmada psikolojik bir üstünlüğün getirisi olarak zikredilmektedir.

Çalışmada geçecek olan Ebu Ubeyde'nin demeçlerinden alıntılar, tüm videoların yazılı metin haline getirildiği elektronik kaynaktan seçilerek alınmıştır. (Husna Radio,2025)

Bu bölümler altında yer alan ifadeler, tarafımızca çevirileri yapıp tenas ve retorik unsurlar bağlamında yorumlanmıştır.

2.4.Sosyo-Kültürel ve Kolektif Hafızaya Ait Tenas ve Retorik Unsurları

Bu başlık altında yer alan ifadeler, tarafımızca çevirileri yapıp tenas ve retorik unsurlar bağlamında yorumlanmıştır.

• **طوفان الأقصى Aksa Tufanı:** Mescidi Aksa'nın kastedilerek bu ismin konulması Müslümanların ortak hafızası canlı tutarak, savaşın, kişisel sebeplerden değil, ortak değerler için başladığını ifade etmektedir. Bu da Müslümanları taraf olma fikrine ikna etmektedir.

وعموما فإذا كان الفاشل تنتباهو يتفاخر ويحتفل بعد شهر من المعركة بتحرير أسيرة واحدة فهذا يعني أنه يحتاج إلى عشرين عاما • Genel olarak bakıldığında, başarısız Netanyahu, çatışmanın üzerinden bir ay geçtikten sonra tek bir esirin kurtarılmasını övünerek kutluyorsa, bu, Gazze'deki geri kalan esirleri de kendi yöntemiyle kurtarmak için yirmi yıla ihtiyacı olduğu anlamına gelir: Ebu Ubeyde düşmanların başarı saydıkları bir durumu basit görerek, bu başarısızlığı zaman ile tasvir ettirerek düşman halkına, başlarındaki idarecinin geleceği olmayan bir lider olarak zihinlerde yer bulmasını sağlamaktadır.

2.5. Dini Tenas Unsurları

Ebu Ubeyde, demeçlerinin tamamında konuşmasına besmele ile başlamış ve hemen ardından genellikle konuşmanın psikolojik durumu ifade eden bir ayetle konuşmasına devam etmiştir. Bu ayetler dinine bağlı olan halkı, psikolojik olarak rahatlatmış aynı zamanda, şartların olumsuz gittiği durumlarda onlara ilahi vaadi hatırlatan etkili bir rol oynamıştır.

•... "قَاتِلُوهُمْ يُعَذِّبُهُمْ" (Tevbe 9/14) *Onlarla savaşın ki, Allah sizin ellerinizle onları cezalandırsın...* (Diyanet İşleri Başkanlığı, Tevbe, 14.): İlk hitabında konuşmasına bu ayetlerle başlamış olması, başlamış oldukları savaşı, bir toprak savaşından çıkarıp ilahi bir anlam ve vaadi olan bir savaş haline getirir. Kendi savaşlarını, beşeri bir eylem değil, Allah'tan gelen bir aracı olarak nitelendirmelerini sağlamaktadır. Bu da içinde bulundukları savaşa meşruiyet kazandırmaktadır. • أَفَعَذَابُنَا يَسْتَعْجِلُونَ، فَإِذَا نَزَلَ بِسَاحَتِهِمْ فَسَاءَ صَبَاحُ الْمُنْذَرِينَ. (Saffat 37/176) *Azabımızın çabuklaştırılmasını mı istiyorlar? İstedikleri başlarına geldiğinde (önceden) uyarılmış olanların sabahı çok kötü olacaktır.* (Diyanet İşleri Başkanlığı, Saffat, 176.): Ebu Ubeyde, ayeti düşmana bir tehdit olarak kullanmasının yanı sıra uyarılanlar konumuna düşmanı koyarak küçümsüyor ve bu ayeti başlarına gelecek olanın bir habercisi olarak kullanıyor. Bu şekilde Ebu Ubeyde, hibrit bir retorik kurarak, ayetin tehditkâr gücünü askeri bir fiil ile harmanlamıştır.

• صدق وعده، ونصر عبده، وأعز جنده وهزم الأحزاب وحده. *Vaadine sadık kaldı, kuluna yardım etti, ordusunu aziz kıldı ve müttefikleri tek başına hezimete uğrattı:* Ebu Ubeyde'nin, Mekke'nin fethi sırasında Peygamber Efendimiz 'in kullandığı bu sözü, sözüne başlarken kullanması ilahi güç ile askerler arasındaki gücü tekrardan hatırlatarak, aynı zamanda komutan kim olursa olsun savaş ve ordunun sahibinin Allah olduğunu temsil etmektedir.

• إنا لن ندخلها أبدا ما داموا فيها. *Onlar orada oldukça biz asla oraya girmeyeceğiz.* (Diyanet İşleri Başkanlığı, Maide, 24.): Ebu Ubeyde'nin sözleri arasında kullanmış olduğu bu söz aslında Maide Suresi 24. Ayetin bir parçasıdır. Ayette asırlar önce İsrailoğulları'nın korkuları sebebiyle Hz. Musa'ya söyledikleri sözü, bugün Ebu Ubeyde'nin İsrail askerlerinin kara savaşına girmekte çekimser davranmaları sebebiyle düşmana atfederek söylemesi, düşmanı atalarının içinde bulunduğu korkaklığa hapsederek onların, psikolojik olarak olumsuz etkilenmelerine sebep olmaktadır.

• فيأكلون مما نأكل ويشربون مما نشرب... هؤلاء ضيوف لدينا. *Onlar (esirler) bizim misafirimizdir. Biz ne yiyip içiyorsak, onlar da ondan yiyip içiyorlar:* Ebu Ubeyde'nin konuşmasında düşman esirlerinden misafir olarak bahsetmesi, Hz. Muhammed'in Bedir'de esirlere uyguladığı muamele ile uyum içerisindedir. Mahrumiyet bölgesi içerisinde olsalar da esirlerin yaşam şartlarının, kendi askerleri ve halkın şartlarıyla eşit oluşu, asırlar önce Bedir'de esir alınan düşmanın mescitlerde halka beraber tutulması ile benzerlik göstermektedir.

• *Mücahitlere yardım eden ve vatan ve dinin kor ateşini avucunda taşıyanların sancağını dalgalandıran alemlerin Rabbi olan Allah'a hamd olsun:* Metinde geçen “avcunda kor ateş taşıyanlar” ifadesi, hadiste geçen zor zamanlarda imanını koruyanların benzetildiği ifade ile aynıdır. Gazze’de iman ve topraklarını korurken zor duruma düşen halk için bu ifadelerin kullanılması, halkın sabrına ilahi bir anlam yüklemesi yapmaktadır.

• *Salat ve selam, الصلاة والسلام على نبينا المجاهد الشهيد الذي بشرنا بأجر المرابطين والمجاهدين والشهداء على سواحل الشام, Şam kıyılarında direnen mücahitlerin ve şehitlerin müjdesini bize veren Peygamberimize olsun:* Ebu Ubeyde, Gazze’yi Şam sahillerinin kalesi niteliğinde bir parçası olarak görmüş ve burada nöbet tutan askerleri, hadiste geçen müjde ile motivasyonları arttırmaktadır.

2.6. Tarihi Tenas Unsurları

• *طوفان الأقصى Aksa Tufanı:* 7 Ekim 2023 savaşının adı olarak zikredilen bu iki kelime, aslı itibariyle tarihte gerçekleşen Nuh Tufan’ına atıf yapmaktadır. Tufanın, tarihte inanan küçük bir topluluğun, imkansızlıklar içinde kurtulma çabalarını verdiği esnada, inanmayanların toplu bir şekilde yok edildiği bir afet olarak ifade edildiğini görmekteyiz. Kassam da aynı kelimeyle, imkansızlıklar ve mahrumiyet içindeki halkın düşmanı yok ederek kurtulması, Mescidi Aksa’ya ulaşma ve özgür olma çabalarını ifade etmektedir.

• *كتائب الشهيد عز الدين القسام İzzettin el Kassam Tugayları:* İsimde geçen İzzettin el Kassam, direnişi başlatan isimlerden biri olarak görünen Kassam komutanının adıdır. Bu ismin kullanılması, bize tarihsel bir tenas ifade ederek davanın geçmişten gelip bugüne kadar devam ettiği mesajını vermektedir.

• *إنه لجهاد نصر أو استشهاد Bu bir cihattır, ya zafer ya şehadet:* Komutan İzzettin el- Kassam’ın ölmeden önce söylediği bu söz, içinde bulunduğu savaşın bir cihat olduğunu ve bu cihadın sonucunun her iki durumda da kendisi için iyi bir sonuca çıktığını ifade etmektedir. Bugün Ebu Ubeyde’nin yapmış olduğu her konuşmayı bu sözle bitiriyor olması, davanın sloganlarla da devam edip nesilden nesile aktarıldığını göstermektedir.

Bu söz aynı zamanda Tarık bin Ziyad’ın “Ey insanlar! Kaçacak yer nerede? Arkanızda deniz, önünüzde düşman! Sözü ile de benzer bir amaç taşımaktadır. Her iki komutan da kaçacak veya gidecek yer olmadığını ima ederek, iki seçenekten birini seçme hakkı tanıyormuş gibi görüldüğü halde, tek seçeneğin zafer olması gerektiğini ima eder.

Bununla birlikte bu söz Ömer Muhtar’ın yargılandığı bir mahkemede tarihe geçen “Biz asla teslim olmayız ya kazanırız ya da ölürüz.” sözleriyle de metinlerarası bir bağ kurmaktadır. Bu şekilde tarihin, karakter ve eylemlerin, mekâna ve zamana bağlı kalmadan tek bir amaca hizmet ettiği de anlaşılmaktadır.

• *يهلكون الحرث والنسل ويمارسون غريزتهم النازية بالإبادة الجماعية أمام Ekini ve nesli yok ediyor, soykırım yoluyla Nazi içgüdülerini sergiliyorlar:* Ebu Ubeyde’nin bu cümlesi hibrit tenasa en net örneklerden biridir. Düşmanı, cümle içerisinde Kuran’ı-Kerim’in fesatçıların özelliği olarak zikrettiği ekini ve nesli helak eden bir konuma koymuştur. Aynı zamanda Nazi içgüdüleri ifadesiyle de yıllar öne Nazilerin kendilerine yapmış olduğu soykırımı, bugün Müslümanlara yaptıklarını ve bu şekilde bir zamanlar

acımasızca düşmanlığı ile tüm dünya tarafından bilinen ve bizzat o dönemin muhatapları olan Yahudileri Nazilere benzeterek İsrail'i aşagılamıştır.

• *Bu savaş, لكنها ستدرس في العالم وسيخلدها التاريخ كما خلد مقارعة داوود لجالوت وانتصار الحق المبين على الباطل المتغطرس. tüm dünyada anılacak ve tarih bu savaşı, Dâvûd ve Câlût mücadelesi gibi açık bir şekilde haklı olanın, bâtıla karşı zaferini ölümsüzleştirdiği gibi ölümsüzleştirecektir:* Ebu Ubeyde, konuşmasının bu kısmında açık bir şekilde tarihte haklı ama küçük olmasına rağmen Dâvûd'un, İsrail gibi haksız ama büyük güçlere sahip olana Câlût'a karşı kazandığı senaryo ile kendi durumlarını benzeştirerek tarihin tekerrürden ibaret olduğunu ima etmektedir.

• *Sizler, Allah'ın Askalan ve çevresinde en hayırlı ribat/nöbet için seçtiği kişilersiniz:* Ebu Ubeyde, nöbet tutan mücahitleri, asırlar önce Hz Muhammed'in nöbet tutulması en hayırlı yer olarak söylediği bölgede nöbet tuttukları için müjdeler ve motivasyonlarını dini bir gerekçe ile güçlendirir.

• *ونريد أن نذكر هؤلاء الواهمين بأن إسحاق شامير حاول وأد مقاومتنا، وكذلك فعل رابين الذي تمنى أن يستيقظ ويرى غزة وقد ابتلعها البحر، ولم تكن في حينه كتابنا سوى بضع عشرات من المجاهدين وبأسلحة خفيفة وفردية، وكذلك شارون الذي وعدكم بالقضاء على الانتفاضة خلال مئة يوم، كل هؤلاء ذهبوا إلى مزابل التاريخ بسجل حافل من قتل الأبرياء، وبقيت مقاومتنا وكبرت وعظمت، فلن تكونوا Ve bu hayalperestlere şunu hatırlatmak istiyoruz; İshak Şamer direnişimizi boğmaya çalıştı; Rabin de öyle yaptı; o, uyanıp Gazze'nin denize gömülmüş olduğunu görmek istiyordu; o dönemde taburlarımız, hafif ve bireysel silahlarla donanmış birkaç düzine mücahitten ibaretti; aynı şekilde Şaron da size intifadayı yüz gün içinde bastıracağına söz vermişti, Bütün bunlar, masum insanları öldürmekle dolu bir sicille tarihin çöplüğüne atıldılar; direnişimiz ise kaldı, büyüdü ve güçlendi. Ey katiller, onlardan daha şanslı olmayacaksınız; Allah'ın izniyle, size sadece hayal kırıklığı ve çöküş bekliyor:* Ebu Ubeyde, düşmanın geçmişteki başarısızlıklarını tek tek dile getirerek düşman askerlerinin psikolojisiyle ve düşman halkının ümidiyle oynamaktadır.

• *فأثبتت دماؤهم نصرا وأورثت أرواحهم مقاومتنا قوة Onların kanları bir zafer filizlendirdi, ruhları da direnişimize gücü miras bıraktı:* Ebu Ubeyde'nin şehit olan mücahitler için söylemiş olduğu bu söz, akla, Aliye İzzetbegoviç'in Bosna Savaşı esnasında söylediği "Bizi toprağa gömdüler fakat tohum olduğumuzu bilmiyorlardı." sözü ile tarihsel bir tenas özelliği taşımaktadır. Her iki ifade de düşmana öldükçe çoğalıyoruz mesajını vererek inanç, umut ve gösterilen direnci ifade etmektedirler.

• *أننا نعلم بأن الحقوق لا تسترد إلا انتزاعا، ولأن كل شعوب الأرض التي احتلت انتزعت حريتها بالدماء والأشلاء وبالقتال، ولنا في Biz biliyoruz ki haklar, ancak sökülerek kazanılır; zira işgal altındaki tüm halklar özgürlüklerini kan, can ve mücadeleyle elde etmişlerdir. Vietnam, Afganistan, Güney Afrika, Irak, Cezayir, Lübnan ve daha pek çok yer, bunun en iyi kanıtıdır:* Ebu Ubeyde, daha önce zulme uğramış olan ülkelerin isimlerini tek tek sayarak, savaşı evrensel bir düzleme taşıyarak, hem mücadeleye meşruiyet kazandırır hem de bu coğrafyada ilk ve yalız olmadığını dünyaya duyurur.

• *فألقى لهم بهزيمة شعب أطفاله يعلمون الكبار العاجزين دروسا في الرجولة، ونسأوه خنساوات يخرجن الأجيال ويصنعن الرجال، Düşman, çocukları güçsüz erkeklere yetişkinlik dersi veren, Hansa gibi kadınlarının da erkekleri şekillendirip, nesilleri yetiştiren kahramanlık ve*

fedakarlık konusunda çağın efsanesi ve zamanın simgesi olan bir halkı nasıl yenebilir?!: Ebu Ubeyde, Hansa gibi kadınlar ifadesinde, kadınları, dört oğlunu Kadisiye Savaşında şehit vermiş olan ve İslam tarihinin en güçlü kadın şairi olarak tarihe geçen el-Hansâ'ya benzeterek kadının yıllardır süregelen gücüne vurgu yapmış ve önemini işaret etmiştir.

• *فيا عابد الحرمين لو أبصرتنا لعلمت أنك بالعبادة تلعب • Ya Âbidi-l Hameyn (Ey iki kutsal mekânın ibadetçisi), bizi görseydin, ibadet adı altında oyun oynadığını anlardın: Ebu Ubeyde'nin dünya Müslümanlarına seslendiği bu demeçte Abdullah b. Mübarek'in cephe ribatı esnasında Kabe'de itikafta olan Fudayl b. İyad'a yazdığı bir şiirden bir iktibas vardır. Klasik belağatta en meşhur sitem sözlerinden biri ile Müslümanlara yaptığı sitemde kendilerinin cihatla kan dökerken, diğer Müslümanların sadece gözyaşı dökmesini pasif görerek eleştirir.*

• *76 منذ ستة وسبعين عاما لا زال صدى صوته لا يحرك فيهم ساكنا بل إن عجزهم بات أكبر وتقاعسهم وخذلانهم أصبح أشد وأقسى • 76 yıl önce dünya liderlerini imdada çağırmanın sesi hala o liderlerde yankı bulmadı: Ebu Ubeyde, 1948 Nekbe döneminde direnişin sembol isimlerinden biri olan Abdulkadir el-Hüseyni'nin dönemin liderlerine yardıma çağırması ve onların sessiz kalışlarına atıf yaparak, bugün aynı şeyin yaşandığını işaret etmektedir.*

• *فلو كانت الاغتيالات نصرا لانتهت المقاومة ضد الاحتلال منذ اغتيال الشيخ عز الدين القسام في أحرار يعبدي جنين قبل تسعين عاما • Eğer suikastlar bir zafer olsaydı, işgale karşı direniş, doksan yıl önce Cen'in Ya'bed ormanlarında Şeyh İzzeddin el-Kassam'ın öldürülmesinden bu yana çoktan sona ermiş olurdu: Ebu Ubeyde, İsmail Heniyye'nin şehadetini duyururken başlangıç noktaları olan isme atıf yaparak, o gün nasıl bitmeyip büyüyerek devam ettiyse, bugün de aynı şekilde olacağını iddia etmektedir.*

Sonuç

Filistin, asırlarca süren mücadele içinde var olma savaşını vermiştir. Bu savaş sadece toprak savaşı değil, tarihi, kültürü, dini ve ırkına karşı süren bir savaş olarak tarihlere geçmiştir. Gazze, yüzölçümü küçüklüğüne rağmen en büyük bombaların kullanıldığı bir bölge olmuştur. Bu durum gerek direnişte, gerek inançta, gerek de umutta en büyük olmasının önüne geçememiş olup algıları ve bakışları daima üzerine çekmeye devam etmiştir. Bu direnişin dış dünyaya açılan yüzü ve sesi de kuşkusuz ki Ebu Ubeyde olmuştur. En büyük silahlardan birinin sözler olduğunu ispatlayarak, savaşı sahadan alıp tüm dünyada medya aracılığıyla gündemlere ve zihinlere taşımıştır. Sıradan bir sözcü gibi sadece askeri raporları vermeyip bu raporları dini, tarihi ve kültürel tenas unsurlarıyla ve retorik anlamda güçlü söylemlerle karıştırarak sunması ise demeçlerinin önemini artırarak zirve bir noktaya taşınmasına olanak sağlamıştır. Bu tenas ve retorik söylemleri kullanmak bazen düşmanı, halkını ve dünya halklarını psikolojik olarak yönetmeye yararken bazen de sözünün etkisi ve inandırıcılığını arttırmasına sebep olmuştur. Ve en temelde bu tarzı kullanarak mücadelesini meşru bir zemine taşınmasını sağlamıştır. Demeçlerinde bu kadar sık rastlanan tenas kavramının yapı taşlarını oluşturan La Bruyère'nin “Her şey daha önce söylenmiştir.” ve “7 bin yıldır insanlar vardılar ve düşünülmektedirler.” sözlerini âdeta ihya ederek, Filistin mücadelesi yıllardır var olduğunu ve bu konuda söylenecek olanın çoktan söylendiğini, bundan sonra söylenenlerin de öncekilerin mücadelesindeki temel taşları temsil ettiğini göstermiştir.

KAYNAKÇA

Açıl, B. (2014). Telmih'e Telmih: Klasik Türk Edebiyatında Geleneğin İnşası. *Erdem*, (67), 5-18. doi:[10.32704/erdem.537397](https://doi.org/10.32704/erdem.537397)

Ahnas, M. O. (2025a). Filistin İslami Direniş Hareketi Olarak Hamas: Kimliği ve Teşkilat Yapısı. *Mevzu – Sosyal Bilimler Dergisi*, (13), 107-130. doi:[10.56720/mevzu.1539471](https://doi.org/10.56720/mevzu.1539471)

Ahnas, M. O. (2025b). Filistin İslami Direniş Hareketi Olarak Hamas: Kimliği ve Teşkilat Yapısı. *Mevzu – Sosyal Bilimler Dergisi*, (13), 107-130.

Aktulum, K. (2000). *Metinlerarası İlişkiler*. Ankara: Öteki Yayınevi.

Alâhim, H.-ûriye ve İbn Süleyman, Ce. (2024). *Ḳuvvetu'l-fi'li'l-kelâm fi'l-ḥitâbi's-siyâsî ledâ el-Mukâvemetil-Filistîniyye. Mecelletu'l-muhterif li-ulûmi'r-riyâdiyye ve'l-ulûmi'l-insâniyye ve'l-içtimâiyye*, 11(3).

Atatanır, H. ve Snoubar, Y. (2025). Gazze'de Çalınan Çocukluk: Soykırım Ve Etnik Temizlik Gölgesinde Çocuk Hakları Ve Sosyal Hizmet Perspektifi. *Türkiye İnsan Hakları ve Eşitlik Kurumu Akademik Dergisi*, 8(14-15), 123-146. doi:[10.59162/tihek.1647661](https://doi.org/10.59162/tihek.1647661)

Bulut, F. (2018). “Metinlerarasılık” Kavramının Kuramsal Çerçevesi. *Edebi Eleştiri Dergisi*, 2(1).

Culbertson, S., Ruthenberg, K., Lane, R., Lehrer, N., Vaiana, M. E. ve Anthony, C. R. (2025). *From Camps to Communities Post-Conflict Shelter in Gaza*. Rand. www.rand.org adresinden erişildi.

Dabbağ, H. A. M. Ş. (2021). *Et-Tenâşu enmâtuhu ve envâ'uhu fi şî'ri'l Mütnebbî*. İsrâ University, Ürdün.

Diyanet İşleri Başkanlığı.(t.y.).Kur'an-ı Kerîm Meali.

Ekin, S. (2025). 7 EKİM ÖNCESİ VE SONRASI FİLİSTİN'DE YAŞANANLAR İLE BM'NİN TUTUMU ÜZERİNE BİR İNCELEME. *Türkiye İnsan Hakları ve Eşitlik Kurumu Akademik Dergisi*, 8(14-15), 359-373. doi:[10.59162/tihek.1642916](https://doi.org/10.59162/tihek.1642916)

Ekiz, T. (2007). Alımlama Estetiği mi Metinlerarasılık mı? *Ankara University Journal of the Faculty of Languages and History-Geography*, 47(2).

el-Kahlut, H. S. (2013). *El- 'Arḍü'l-Mukaddese Beyne'l-Yehûdiyye ve'n-Naşrâniyye ve'l-İslâm*. Gazze İslam Üviversitesi, Gazze.

el-'Aklük, Y. (t.y.). Men el-mer'etü'lletî vaqafet ḥalfe'l-müleşşem. *Aljazeera.net*. 30 Nisan 2026 tarihinde <https://www.aljazeera.net/family/2026/1/6/%d9%85%d9%86->

[%d8%a7%d9%84%d9%85%d8%b1%d8%a3%d8%a9-%d8%a7%d9%84%d8%aa%d9%8a-%d9%88%d9%82%d9%81%d8%aa-%d8%ae%d9%84%d9%81-%d8%a7%d9%84%d9%85%d9%84%d8%ab%d9%85](#) adresinden erişildi.

“Hamās” tekşif veche “Ebū ‘Ubeyde”.. Hāzihi qıssat Huzeyfe Semūr ‘Abd Allāh el-Kahlūt. (2025, 29 Aralık). *Asharq News*. 30 Nisan 2026 tarihinde <https://asharq.com/politics/165947/%D8%AA%D8%A3%D9%83%D9%8A%D8%AF-%D8%A7%D8%BA%D8%AA%D9%8A%D8%A7%D9%84-%D8%A3%D8%A8%D9%88-%D8%B9%D8%A8%D9%8A%D8%AF%D8%A9-%D9%87%D8%B0%D9%87-%D9%82%D8%B5%D8%A9-%D8%AD%D8%B0%D9%8A%D9%81%D8%A9-%D8%B3%D9%85%D9%8A%D8%B1-%D8%B9%D8%A8%D8%AF-%D8%A7%D9%84%D9%84%D9%87-%D8%A7%D9%84%D9%83%D8%AD%D9%84%D9%88%D8%AA/> adresinden erişildi.

Husna Radio (2025). *Hıṭābāt ebū ‘ubeyde*. Sprintive. Erişim tarihi:14 Mayıs 2026 <https://husna.fm/عبيدة-أبو-خطابات?page=5>

Huzeyfe el-Kahlūt.. Ebū ‘Ubeyde el-Evvel en-Nāṭık bi-ismi’l-Kassām. (t.y.). *Aljazeera.net*. 30 Nisan 2026 tarihinde <https://www.aljazeera.net/encyclopedia/2025/12/29/%d8%a3%d8%a8%d9%88-%d8%b9%d8%a8%d9%8a%d8%af%d8%a9-%d8%b5%d9%88%d8%aa-%d8%a7%d9%84%d9%85%d9%82%d8%a7%d9%88%d9%85%d8%a9-%d8%a7%d9%84%d9%81%d9%84%d8%b3%d8%b7%d9%8a%d9%86%d9%8a%d8%a9> adresinden erişildi.

Kara, İ. (2021). Arap Belâgatında İktibas Sanatı. *Artuklu Akademi*, 8(1), 77-98. doi:[10.34247/artukluakademi.886616](https://doi.org/10.34247/artukluakademi.886616)

Kenar, N. ve Sehweil, S. I. (2025). El-Aksa Tufanı Operasyonu ve Filistin Sorununun Çözümüne Etkileri. *Sakarya Üniversitesi İktisat Dergisi*, 14(1).

Meşal, H. (2008). Filistin Araştırmaları Dergisi ile Diyalog. *Filistin Araştırmaları Enstitüsü*, 19(6), 68.

Öksüz, M. (2015). Telmih ya da Geçmişe Göz Ucuyla Bakma. *Dil ve Edebiyat Dergisi*, (767-768), 247-250.

Sâbir, A. (2024). Āliyātü’l-İknā‘ fî Hıṭābātī’l-Mütehadḍis li-Ketā’ibi’l-Kassām (Ebū ‘Ubeyde) Muḳārebe Tedāvüliyye. *Mecelletü’l-dirâsâtü’l-insâniyye ve’l-edebiyye*, (30), 511-565.

Şaḳīq Ebū ‘Ubeyde yekşif ‘an melāmiḥ min tefāṣīli ḥayātiḥ. (t.y.). *Aljazeera.net*. 30 Nisan 2026 tarihinde <https://www.aljazeera.net/politics/2025/12/29/%d8%b4%d9%82%d9%8a%d9%82-%d8%a3%d8%a8%d9%88-%d8%b9%d8%a8%d9%8a%d8%af%d8%a9-%d9%8a%d9%83%d8%b4%d9%81-%d8%b9%d9%86-%d9%85%d9%84%d8%a7%d9%85%d8%ad-%d9%85%d9%86-%d8%aa%d9%81%d8%a7%d8%b5%d9%8a%d9%84> adresinden erişildi.

Tamimi, A. (2007). *Hamas A History From Within*. United States of America: Olive Branch Press.

Tosun, E. (2024). Tarihsel Bağlamda Filistin Meselesi. *Tarih İncelemeleri, Yaz*, 208-211.

Yıldırım, S. (2024). Ebû Ubeyde'nin Demeçlerinde Referans Aldığı Hadisler ve Hz. Peygamber (s.a.v.) Vurgusu. *Temel İslam Bilimlerine Modern Yaklaşımlar* içinde (ss. 115-130). İstanbul: Kitap Dünyası.

Who Is Really Consuming Green? Different Faces of Sustainable Consumer Profiles

Tutku EKER İŞÇİOĞLU

¹E-mail: teiscioglu@pirireis.edu.tr; Piri Reis University, Faculty of Economics and Administrative Sciences, Department of International Trade and Business, İstanbul / Türkiye.

Abstract

The purpose of this study is to identify sustainable consumer profiles through temporal orientation, life orientation, and normative tendencies, and to examine whether these groups are different in terms of Green Purchase Intention (GPI). Data were collected from 346 participants via an online questionnaire. K-Means cluster analysis resulted in four clusters, which were labelled “Highly Engaged Green Consumers”, “Norm-Driven Sustainable Consumers”, “Hedonic and Morally Disconnected Consumers” and “Environmentally Detached Consumers”. Welch ANOVA showed significant differences between clusters in terms of GPI ($F = 92.2, p < .001$). The “Highly Engaged Green Consumers” had the highest GPI level, while “Norm-Driven Sustainable Consumers” also showed relatively high GPI levels. By contrast, “Hedonic and Morally Disconnected Consumers” and “Environmentally Detached Consumers” got significantly lower scores on GPI. The results show that sustainable consumers are not a homogeneous group and that sustainable marketing strategies should be designed according to different psychological consumer profiles.

Keywords: Green Purchase Intention, Life Orientations, Temporal Orientations, Norm Activation Theory

Özet

Bu çalışmanın amacı, sürdürülebilir tüketici profillerini zaman yönelimi, yaşam yönelimi ve normatif eğilimler doğrultusunda belirlemek ve bu grupların Yeşil Satın Alma Niyeti (YSAN) açısından farklılıklarını incelemektir. Veriler, çevrimiçi anket yoluyla 346 katılımcıdan toplanmıştır. K-Means kümeleme analizi ile belirlenen dört küme, “Yüksek Düzeyde Çevreye Duyarlı Tüketiciler”, “Normatif Değerlerle Yönlendirilen Sürdürülebilir Tüketiciler”, “Hedonik ve Ahlaki Açından Kopuk Tüketiciler” ve “Çevresel Konulara Uzak Tüketiciler” olarak adlandırılmıştır. Welch ANOVA sonuçları, kümelerin YSAN düzeylerinin anlamlı biçimde farklılaştığını göstermiştir ($F = 92.2, p < .001$). En yüksek YSAN düzeyi, “Yüksek Düzeyde Çevreye Duyarlı Tüketiciler” grubunda gözlemlenirken, “Normatif Değerlerle Yönlendirilen Sürdürülebilir Tüketiciler” grubunun da görece yüksek YSAN düzeyine sahip

olduğu belirlenmiştir. Buna karşılık, hedonik yönelimi yüksek ve normatif sorumluluk düzeyi düşük olan “Hedonik ve Ahlaki Açından Kopuk Tüketiciler” ile tüm boyutlarda düşük skor sergileyen “Çevresel Konulara Uzak Tüketiciler” grubunda düşük YSAN düzeyi olduğu görülmüştür. Bulgular, sürdürülebilir tüketicilerin homojen bir yapı sergilemediğini ve sürdürülebilir pazarlama stratejilerinin farklı psikolojik tüketici profillerine göre tasarlanması gerektiğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Yeşil Satın Alma Niyeti, Yaşam Yönelimi, Zaman Yönelimi, Norm Aktivasyon Teorisi

INTRODUCTION

Today, global problems such as climate change, depletion of natural resources, environmental pollution, and biodiversity loss have made sustainable consumption behaviours increasingly important in both academic literature and practice. In particular, consumers' intentions to purchase environmentally friendly products have become one of the fundamental research topics in the field of sustainable marketing. Green purchase intention is the consumers' tendency to buy environmentally friendly products taking their environmental impact into consideration (Tian et al., 2022).

There are numerous studies in the literature aimed at explaining environmentally friendly consumption behaviours. In particular, the impact of normative mechanisms such as awareness of consequences, attribution of responsibility, and personal norms on sustainable consumption has been often investigated within the framework of Norm Activation Theory. However, it is believed that sustainable consumption behaviours cannot be explained only by normative or cognitive mechanisms; the types of temporal and life orientations also play an important role in this process.

Existing literature reveals that sustainable consumers are mostly treated as a homogeneous group, and studies that consider individuals' temporal and life orientations, and normative tendencies together to create psychological consumer profiles are quite limited. Accordingly, this study aims to determine whether consumers can be categorized into different psychological profiles based on their temporal and life orientations, and normative mechanisms, and to examine whether these profiles show significant differences in terms of green purchase intention. Thus, the study contributes to the literature by addressing sustainable consumption behaviours through multidimensional psychological structures.

LITERATURE REVIEW

Norm Activation Theory and Green Purchase Intention

Norm Activation Theory (NAT) was originally developed by (Schwartz, 1977) to promote altruistic (selfless) living; it was later widely applied in research on environmentally friendly behaviour.

The theory proposes that personal norms are the strongest predictors of individual behaviour, and these norms are activated by the simultaneous occurrence of two factors: (1) Awareness of consequences (AC) and (2) Ascription of responsibility (AR) (De Groot & Steg, 2009).

Awareness of consequences (AC) refers to the cognitive awareness that individuals have regarding the negative consequences of current environmental conditions. This dimension is directly related to whether people understand the environmental damage that inaction will cause (Blamey, 1998; Schwartz, 1977). Research shows that high awareness of the potential consequences of environmental problems leads individuals to accept their personal responsibilities and thus activates personal norms (Harland et al., 2007). Ascription of responsibility (AR) reflects people's beliefs about their individual contributions to solving environmental problems. Empirical findings reveal that individuals with high levels of AR are significantly more likely to develop a sense of moral obligation and engage in environmentally friendly behaviour (Han, 2014). Finally, personal norms (PN) enable the continuation of internalized breakdowns related to performing or maintaining a sensitive action. While these norms are qualitatively distinguishable from attitudes and social norms, they are directly integrated with individual value systems (Schwartz, 1977; Schwartz & Howard, 1980).

Temporal Orientation and Sustainable Consumption

Temporal orientation is a psychological construct that explains how individuals balance past, present, and future perspectives when making daily decisions. Temporal orientation provides a pertinent lens to scrutinize individual differences in sustainable consumption in relation to the time preference dilemma, i.e., the choice between immediate gratification and future environmental consequences, which is central to an environmentally conscious buying decision (Wang & Chao, 2019).

Carpe Diem (CD) is the present aspect of temporal orientation that encompasses the focus on the importance of the present moment, instant experiences, and short-term hedonic gratification. This difference in orientation among individuals directly affects environmental decision-making: "Present feelings are often so powerful that considerations of future events are neglected" and hedonistic and impulsive present orientations are negative predictors of sustainable behaviour (Wittmann & Sircova, 2018). The Consideration of Future Consequences (CFC) is the degree to which individuals consider the potential distant consequences of their current behaviour and the level of influence they have on these potential consequences (Strathman et al., 1994). Milfont et al. (2012) reported the results of several studies showing that strong future orientation was consistently related to sustainable attitudes and behaviours. It has also been found that future-oriented consumers are significantly more likely to purchase environmentally friendly products (Wang & Chao, 2019). Future Anxiety (FA) is a type of anxiety experienced by individuals due to uncertainty about the future, potential negative events and possible failures (Duplaga & Grysztar, 2021). FA can focus the individual's attention on long-term consequences, and increase the awareness of environmental risks, which in turn has a positive effect on purchasing eco-friendly products (Baloğlu Sevinç et al., 2025).

Life Orientations and Sustainable Consumption

Life orientation research divides general well-being into two basic dimensions: hedonic and eudaimonic orientation (Ryan & Deci, 2001). Hedonic orientation (HO) is a way of life that focuses on pleasure, avoiding pain and immediate gratification, while eudaimonic orientation (EO) is about the meaning of life, personal growth and doing things in accordance with one's values (Huta & Ryan, 2010).

High HO is generally negatively related to sustainable consumption as this kind of orientation is in line with the materialistic and immediate gratification-oriented decision-making patterns (Lin et al., 2023). Environmentally responsible behaviours such as reducing car usage, conserving energy and purchasing organic products often require individuals to compromise self-centred preferences in favour of protecting environmental well-being (Samuelson, 1990). Previous studies have reported hedonic shopping value as a negative predictor of green purchase intention (Lin et al., 2023).

EO, on the other hand, is positively and consistently associated with sustainable consumption behaviour because this orientation directs individuals to seek meaning and long-term satisfaction through actions that are aligned with their values (Lima & Mariano, 2022). Issock Issock et al. (2023) demonstrated that eudaimonic well-being (meaning, self-actualization) is strongly related to environmental concern and provides the basis for behavioural consistency. Polisetty et al. (2024) found that eudaimonic motivation led people to take sustainable actions irrespective of their environmental knowledge, indicating that EO serves as a strong and robust psychological basis for environmental responsibility.

Sustainable Consumer Segmentation

It is a well-established finding in the research literature that sustainable consumers do not exhibit a homogeneous structure. The pioneering study by (Finisterra Do Paço et al., 2009) divided consumers into three clusters: "The uncommitted," "The green activists," and "The undefined "; it revealed that these clusters exhibited statistically significant differences in terms of environmental attitudes, knowledge, and purchasing behaviour. The researchers emphasized that not only demographic variables but also psychographic characteristics such as values and attitudes are critical determinants in consumer segmentation. More recent studies have expanded this approach by adding environmental identity, green self-efficacy, and moral values to the segmentation variables. For example, (Jaiswal et al., 2021) identified three different consumer segments such as "keen greens," "moderate greens," and "reluctant greens" based on eight cognitive factors including environmental concern, perceived environmental knowledge, perceived consumer effectiveness, perceptions of eco-labels, eco-brands and environmental advertising, as well as green purchase intention and green purchasing behaviour.

METHODOLOGY

This study aims to examine whether individuals can be categorized into different psychological consumer profiles based on their temporal orientations, life orientations, and normative mechanisms

related to sustainable consumption, and whether these profiles differ in terms of green purchase intention (GPI). Accordingly, the following research questions have been developed:

- RQ1: Can consumers be categorized into different psychological profiles according to their temporal orientation, life orientation, and normative tendencies?
- RQ2: Do these consumer profiles differ significantly in terms of green purchase intention?
- RQ3: Which psychological consumer profile has the highest level of green purchase intention?

The survey form used in the research was adapted from scales of which validity and reliability have been previously ensured. The study includes the variables of temporal orientation, life orientation, norm activation theory components, and green purchase intention. The variables related to temporal orientation were Consideration of Future Consequences (CFC - Bruderer Enzler, 2015), Future Anxiety (FA - Zaleski et al., 2019), and Carpe Diem (CD - Sobol-Kwapinska, 2009). Within the scope of life orientations, Hedonic Orientation (HO - Huta, 2016) and Eudaimonic Orientation (EO - Huta, 2016) were used. To measure normative mechanisms within the framework of Norm Activation Theory (NAT), Awareness of Consequences (AC), Ascription of Responsibility, and Personal Norms (PN) were measured with scales adopted from Jhawar et al. (2024). Finally, Green Purchase Intention (GPI) measure was adopted from Wee et al. (2014). All items were measured using 7-point Likert scales. Before the analyses, mean scale scores were calculated for each construct.

In the first stage, a pilot study involving 39 participants was carried out to evaluate the clarity and comprehensibility of the questionnaire items and to identify any potentially ambiguous or leading statements. Based on the feedback obtained, necessary revisions were made and the final version of the questionnaire was created using Google Forms. The online questionnaire was shared through the researchers' professional and social networks, and then participants were asked to share the questionnaire with the individuals they know. A total of 346 usable surveys were obtained and included in the analyses. The Jamovi statistical program was used and Cluster Analysis was utilized as it is highly preferred in green market segmentation studies (Finisterra Do Paço et al., 2009; Jaiswal et al., 2021).

The research population consists of consumers living in Türkiye. Snowball sampling was utilized in the research. The main reason for choosing snowball sampling is that it facilitates access to participants who are aware of concepts such as sustainable consumption, life orientation, and normative evaluation. The sample consisted of a total of 346 participants, of which 49.7% were male and 50.3% were female. The vast majority of participants were bachelor's degree graduates (69.7%); followed by associate degree (20.8%), master's degree (6.9%), and doctorate (2.6%) graduates. In terms of marital status, 54.9% of the participants were single and 45.1% were married. 33.5% of the participants were under 30 years old, 21.4% were in the 40-49 age range, and 17.6% were in the 30-39 age range. According to occupation, 51.7% of the participants were working, 23.1% were students, 16.2% were retired, and 9% were unemployed. Looking at income levels, the highest concentration of participants is in the 50,000-100,000 TL income range (42.5%), followed by the below 50,000 TL income group (25.7%).

FINDINGS

In the first stage, hierarchical clustering analysis was performed using the Ward.D2 method and the Euclidean distance measure. The analysis results showed that the sample was divided into two main clusters. Examination of the dendrogram structure revealed that more detailed and theoretically significant sub-clusters could be achieved. Accordingly, in the second stage, K-Means Cluster Analysis was applied, and the different cluster solutions were compared. As a result, it was determined that the four-cluster solution presented a theoretically interpretable and statistically more significant structure.

Table 1. displays the number of consumers in each cluster and the cluster centroids. When the cluster centroids are examined, it is seen that the clusters are distinctly separated from each other. In Cluster 1, all variables were found to have high positive values. This group was named "Highly Engaged Green Consumers" because it exhibited high scores in terms of both future orientation level, hedonic and eudaimonic life orientations, and normative responsibility dimensions. In Cluster 2, it was observed that normative variables (AC, AR, and PN) were particularly positive, but temporal and life orientations remained at a lower level. Therefore, this cluster was named "Norm Driven Sustainable Consumers". In Cluster 3, the hedonic orientation variable was relatively positive, but eudaimonic orientation and normative responsibility dimensions were found to be low. This situation indicates that this group evaluates sustainable consumption more in terms of individual pleasure or experience, but the level of long-term satisfaction and moral responsibility is low. Therefore, this cluster was named "Hedonic and Morally Disconnected Consumers". Cluster 4, having negative values in all variables, represents a low level of interest and responsibility towards environmental issues. This group has been defined as "Environmentally Detached Consumers". The results can be better observed from Figure 1.

Table 1. *Cluster count and centroids*

	Count (n)	zCFC	zFA	zCD	zHO	zEO	zAR	zAC	zPN
Cluster 1	112	0.693	0.747	0.611	0.610	0.640	0.748	0.736	0.729
Cluster 2	107	-0.160	-0.057	-0.173	-0.293	-0.040	0.241	0.313	0.385
Cluster 3	93	0.001	-0.292	-0.032	0.213	-0.096	-0.733	-0.830	-1.006
Cluster 4	34	-1.781	-1.480	-1.380	-1.669	-1.720	-1.219	-1.141	-0.861

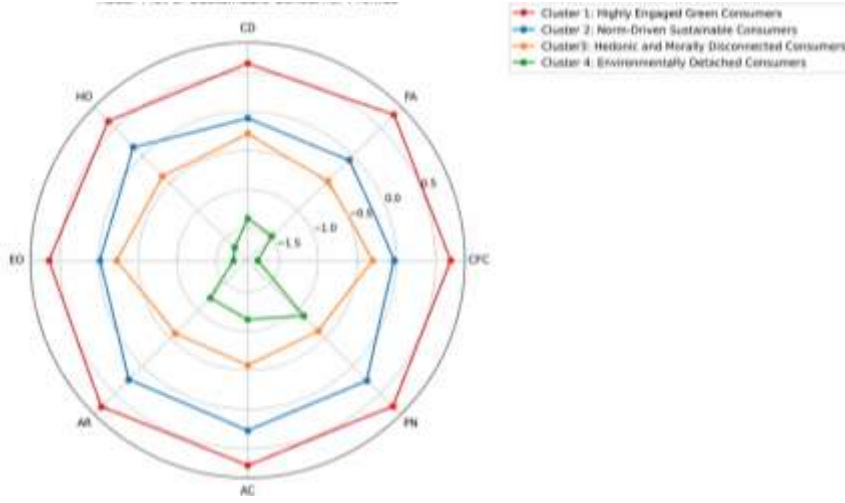


Figure 1. Radar Plot of Sustainable Consumer Profiles

In the third stage of the research, Welch ANOVA analysis was applied to examine whether the GPI levels of the clusters differed. Since the assumption of homogeneity of variance was not met, Welch ANOVA and Games-Howell post-hoc test were preferred in the analyses. The results presented in Table 2. showed statistically significant differences in GPI among the clusters. Examining the group descriptives, the highest average GPI was found in the "Highly Engaged Green Consumers" group (Mean = 6.18). This group was followed by the "Norm Driven Sustainable Consumers" group (Mean = 5.77). Conversely, the "Hedonic and Morally Disconnected Consumers" (Mean = 3.81) and "Environmentally Detached Consumers" (Mean = 3.20) groups were found to have lower levels of green purchase intention.

The Games-Howell post-hoc test results showed significant differences between Cluster 1 and all other clusters, as can be observed in Table 3. In particular, the differences between Cluster 1 and Clusters 3 and 4 were found to be quite high ($p < .001$). Significant differences were also found between Cluster 2 and Clusters 3 and 4 ($p < .001$). However, no significant difference was found between Cluster 3 and Cluster 4 in terms of green purchase intention ($p = .182$).

Table 2. *Cluster descriptives*

Cluster	N	Mean	SD	SE	F	df1	df2	p
1	112	6,18	1.088	0.1028	92.2	3	119	<.001
2	107	5,77	0.872	0.0843				
3	93	3,81	1.314	0.1363				
4	34	3,20	1.557	0.2670				

Table 3. *Games-Howell Post-Hoc Test – GPI*

Cluster		1	2	3	4
1	Mean difference	—	0.408	2.364	2.980
	p-value	—	.013	<.001	<.001
2	Mean difference		—	1.957	2.572
	p-value		—	<.001	<.001
3	Mean difference			—	0.616
	p-value			—	.182
4	Mean difference				—
	p-value				—

DISCUSSION AND CONCLUSION

This study aimed to examine whether sustainable consumers exhibit a homogeneous structure by categorizing individuals into psychological profiles based on temporal orientation, life orientation, and normative mechanisms, and comparing the green purchase intention (GPI) levels of these profiles.

The findings show that sustainable consumers are not a single, uniform group; rather, they consist of segments that differ according to various psychological motivations and orientations.

The research findings revealed that the "Highly Engaged Green Consumers" group had the highest GPI level. The high scores of this group in terms of all variables demonstrate that sustainable consumption is related not only to moral responsibility but also to how individuals derive meaning, satisfaction, and personal value from life. This finding supports the idea that sustainable consumption behaviours should be explained by multidimensional psychological mechanisms. The study also determined that the "Norm-Driven Sustainable Consumers" group had a high GPI level. This result supports the importance of NAT in explaining sustainable consumption behaviours. Specifically, individuals with high scores on the variables of awareness of consequences, ascription of responsibility, and personal norms tend to translate their perception of environmental responsibility into behavioural intention. One of the striking aspects of the findings is that the "Hedonic and Morally Disconnected Consumers" group shows a low GPI due to their relatively high level of hedonic orientation. This indicates that a pleasure-oriented lifestyle orientation does not support sustainable consumption. The study also identified that the "Environmentally Detached Consumers" group exhibited low scores in all variables and had the lowest level of GPI. This result shows that sustainable consumption behaviours are associated not only with a lack of environmental awareness, but also with low sensitivity to the future and a weak perception of normative responsibilities.

The findings of this study is consistent with previous segmentation studies that have shown that sustainable consumers do not exhibit a homogeneous structure. In particular, there are conceptual similarities between the "green activists" and "uncommitted" consumer groups identified by (Finisterra Do Paço et al. (2009) and the "Highly Engaged Green Consumers" and "Environmentally Detached Consumers" clusters identified in this study. Similarly, the "keen greens" and "reluctant greens" segments identified by (Jaiswal et al. (2021) also overlap with the high and low environmental awareness profiles obtained in this study. However, unlike previous research, the current study explains sustainable consumer segmentation not only through environmental knowledge or attitude variables, but also by considering temporal orientation, life orientation, and normative mechanisms together, providing additional segments to consider.

This study offers several theoretical contributions to the sustainable consumption literature. Firstly, the research provides a segmentation-based approach which shows that sustainable consumers do not have a homogeneous structure. While many of the studies in the literature are focused on the examination of direct relationships among variables, this study shows the heterogeneous nature of sustainable consumption behaviours through revealing different psychological consumer profiles. Secondly, the study explains the multidimensional psychological structure of sustainable consumption behaviours by considering the temporal and life orientation, and Norm Activation Theory variables in the same model.

The research findings also have important implications for business, sustainability managers and policy makers. First, the findings suggest that it may not be effective to communicate the same sustainability

messages to all consumers. Sustainable marketing strategies should be designed on a segment-by-segment basis because consumers have different psychological profiles. For the “Highly Engaged Green Consumers” group, communication strategies focusing on sustainability, long-term environmental impacts and ethical responsibility can be effective. Campaigns that focus on environmental responsibility, ethical consumption and individual contribution might be more effective for “Norm-Driven Sustainable Consumers”. In the “Hedonic and Morally Disconnected Consumers” group, overly moralized sustainability messages may be ineffective. Therefore, sustainable products should be positioned not as products based on sacrifice, but as products that improve quality of life. For the “Environmentally Detached Consumers” group, cognitive campaigns aimed at increasing environmental awareness are primarily needed. These consumers have a low perception of sustainability and normative responsibility; therefore, education and awareness raising efforts are essential to build an understanding of basic environmental consequences.

This research has some limitations. Firstly, the research data were obtained from consumers living in Türkiye. Cultural values, perceptions of sustainability, and consumption habits may vary in different societies, so the results need to be retested in different cultural contexts. Secondly, the research used the snowball sampling method. It is recommended that future studies use broader samples with different demographic characteristics. Thirdly, the study was conducted using cross-sectional data. Therefore, the change in consumer profiles over time could not be examined. In future research, longitudinal studies could be conducted to analyse the transformation of sustainable consumer profiles over time.

In conclusion, when the research results are evaluated overall, it is seen that not only a single psychological mechanism is effective on GPI; the temporal orientations, life orientations, and norm activation mechanisms also matter. Individuals who are future-oriented, have both a strong tendency to derive meaning from life and normative responsibility mechanisms are more inclined towards sustainable consumption behaviours.

REFERENCES

- Baloğlu Sevinç, S., Kurtuluş, S., & Dirsehan, T. (2025). Generational Shades of Green: How Future Anxiety Shapes Environmental and Frugal Consumption? *Marmara Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 47(2), 266–285. <https://doi.org/10.14780/muiibd.1606393>
- Blamey, R. (1998). The Activation of Environmental Norms: Extending Schwartz’s Model. *Environment and Behavior*, 30(5), 676–708. <https://doi.org/10.1177/001391659803000505>
- Bruderer Enzler, H. (2015). Consideration of Future Consequences as a Predictor of Environmentally Responsible Behavior: Evidence From a General Population Study. *Environment and Behavior*, 47(6), 618–643. <https://doi.org/10.1177/0013916513512204>

- De Groot, J. I. M., & Steg, L. (2009). Morality and Prosocial Behavior: The Role of Awareness, Responsibility, and Norms in the Norm Activation Model. *The Journal of Social Psychology*, 149(4), 425–449. <https://doi.org/10.3200/SOCP.149.4.425-449>
- Duplaga, M., & Grysztar, M. (2021). The Association between Future Anxiety, Health Literacy and the Perception of the COVID-19 Pandemic: A Cross-Sectional Study. *Healthcare*, 9(1), 43. <https://doi.org/10.3390/healthcare9010043>
- Finisterra Do Paço, A. M., Barata Raposo, M. L., & Filho, W. L. (2009). Identifying the green consumer: A segmentation study. *Journal of Targeting, Measurement and Analysis for Marketing*, 17(1), 17–25. <https://doi.org/10.1057/jt.2008.28>
- Han, H. (2014). The norm activation model and theory-broadening: Individuals' decision-making on environmentally-responsible convention attendance. *Journal of Environmental Psychology*, 40, 462–471. <https://doi.org/10.1016/j.jenvp.2014.10.006>
- Harland, P., Staats, H., & Wilke, H. A. M. (2007). Situational and Personality Factors as Direct or Personal Norm Mediated Predictors of Pro-environmental Behavior: Questions Derived From Norm-activation Theory. *Basic and Applied Social Psychology*, 29(4), 323–334. <https://doi.org/10.1080/01973530701665058>
- Huta, V. (2016). Eudaimonic and Hedonic Orientations: Theoretical Considerations and Research Findings. In J. Vittersø (Ed.), *Handbook of Eudaimonic Well-Being* (pp. 215–231). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-42445-3_15
- Huta, V., & Ryan, R. M. (2010). Pursuing Pleasure or Virtue: The Differential and Overlapping Well-Being Benefits of Hedonic and Eudaimonic Motives. *Journal of Happiness Studies*, 11(6), 735–762. <https://doi.org/10.1007/s10902-009-9171-4>
- Issock Issock, P. B., Mpinganjira, M., & Roberts-Lombard, M. (2023). Beyond sustainable consumption practices: Linking organic food consumption to hedonic and eudaimonic well-being. *Appetite*, 188, 106633. <https://doi.org/10.1016/j.appet.2023.106633>
- Jaiswal, D., Kaushal, V., Singh, P. K., & Biswas, A. (2021). Green market segmentation and consumer profiling: A cluster approach to an emerging consumer market. *Benchmarking: An International Journal*, 28(3), 792–812. <https://doi.org/10.1108/BIJ-05-2020-0247>
- Jhawar, A., Kumar, P., & Israel, D. (2024). Impact of materialism on tourists' green purchase behavior: Extended norm activation model perspective. *Journal of Vacation Marketing*, 30(4), 841–855. <https://doi.org/10.1177/13567667231178328>
- Lima, P. A. B., & Mariano, E. B. (2022). Eudaimonia in the relationship between human and nature: A systematic literature review. *Cleaner Production Letters*, 2, 100007. <https://doi.org/10.1016/j.clpl.2022.100007>
- Lin, C. A., Wang, X., & Yang, Y. (2023). Sustainable Apparel Consumption: Personal Norms, CSR Expectations, and Hedonic vs. Utilitarian Shopping Value. *Sustainability*, 15(11), 9116. <https://doi.org/10.3390/su15119116>
- Milfont, T. L., Wilson, J., & Diniz, P. (2012). Time perspective and environmental engagement: A meta-analysis. *International Journal of Psychology*, 47(5), 325–334. <https://doi.org/10.1080/00207594.2011.647029>

- Polisetty, A., Chakraborty, D., Singu, H. B., & Behl, A. (2024). Examining the relationship between pro-environmental consumption behaviour and hedonic and eudaimonic motivation. *Journal of Environmental Management*, 359, 121095. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121095>
- Ryan, R. M., & Deci, E. L. (2001). On Happiness and Human Potentials: A Review of Research on Hedonic and Eudaimonic Well-Being. *Annual Review of Psychology*, 52(1), 141–166. <https://doi.org/10.1146/annurev.psych.52.1.141>
- Samuelson, C. D. (1990). Energy conservation: A social dilemma approach. *Social Behaviour*, 5(4), 207–230.
- Schwartz, S. H. (1977). Normative Influences on Altruism. In *Advances in Experimental Social Psychology* (Vol. 10, pp. 221–279). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0065-2601\(08\)60358-5](https://doi.org/10.1016/S0065-2601(08)60358-5)
- Schwartz, S. H., & Howard, J. A. (1980). Explanations of the Moderating Effect of Responsibility Denial on the Personal Norm-Behavior Relationship. *Social Psychology Quarterly*, 43(4), 441. <https://doi.org/10.2307/3033965>
- Sobol-Kwapinska, M. (2009). Forms of present time orientation and satisfaction with life in the context of attitudes toward past and future. *Social Behavior and Personality: An International Journal*, 37(4), 433–440. <https://doi.org/10.2224/sbp.2009.37.4.433>
- Strathman, A., Gleicher, F., Boninger, D. S., & Edwards, C. S. (1994). The consideration of future consequences: Weighing immediate and distant outcomes of behavior. *Journal of Personality and Social Psychology*, 66(4), 742–752. <https://doi.org/10.1037/0022-3514.66.4.742>
- Tian, Z., Sun, X., Wang, J., Su, W., & Li, G. (2022). Factors Affecting Green Purchase Intention: A Perspective of Ethical Decision Making. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(18), 11151. <https://doi.org/10.3390/ijerph191811151>
- Wang, X., & Chao, C.-H. (2019). Nostalgia decreases green consumption: The mediating role of past orientation. *BRQ Business Research Quarterly*, S2340943618302251. <https://doi.org/10.1016/j.brq.2019.03.005>
- Wee, C. S., Ariff, M. S. B. M., Zakuan, N., Tajudin, M. N. M., Ismail, K., & Ishak, N. (2014). Consumers' perception, purchase intention and actual purchase behavior of organic food products. *Review of Integrative Business and Economics Research*, 3(2), 378.
- Wittmann, M., & Sircova, A. (2018). Dispositional orientation to the present and future and its role in pro-environmental behavior and sustainability. *Heliyon*, 4(10), e00882. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2018.e00882>
- Zaleski, Z., Sobol-Kwapinska, M., Przepiorka, A., & Meisner, M. (2019). Development and validation of the Dark Future scale. *Time & Society*, 28(1), 107–123. <https://doi.org/10.1177/0961463X16678257>

Önleme Ve İstihbari Amaçlı İletişimin Denetlenmesi, Koşulları Ve Elde Edilen Verilerin Suçların Soruşturması Ve Kovuşturulmasında Kullanılması Sorunu

Sabahat DEMİRCİ¹

¹E-mail: av.sabahatdemirci@gmail.com; Süleyman Demirel Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü.
Kamu Hukuku Anabilim Dalı, Isparta/ Türkiye.

Özet

Önleme ve istihbari amaçlı iletişimin denetlenmesi tedbiri ile adli amaçlı iletişimin denetlenmesi tedbiri aynı hakka ilişkin kısıtlama getiriyor olsa da kararı alan merci de dâhil olmak üzere tedbirlerin koşulları ve amaçları birbirinden farklıdır. Adli amaçlı iletişimin denetlenmesi tedbiri hukuka uygun olarak alınmış bir kararla uygulanmış ise elde edilen veriler delil niteliğindeyken, önleme ve istihbari amaçlı iletişimin denetlenmesi tedbirinden elde edilen veriler kararın hukuka uygun olup olmamasına bakılmaksızın; amacı ve niteliği gereği delil olarak kullanılamayacaktır. Bu verilerin sınıflandırılmasında hukuki bir belirsizlik bulunmaktadır. Önleme ve istihbari amaçlı iletişimin denetlenmesi tedbirine dair hükümler özel kanunlarda düzenleniyor olup, tedvin edilmemiştir. Tedbirin farklı kanunlarda düzenlenmesi fazlaca yorum farklılıklarına dolayısıyla öğretide farklı görüşler oluşmasına sebep olmuştur. Bununla birlikte tedbirlerin düzenlendiği mevzuatın sürekli olarak değişikliğe uğraması, yapılan araştırmalarda mülga kanunlara yapılan atıflarda kanunların ilga edildiğinin belirtilmemesi akademik anlamda bilgi kirliliğine sebep olmuş vaziyettir. Bu çalışmada önleme amaçlı iletişimin denetlenmesi koşullarına, müdahalenin hukuka uygunluğunu sağlayan güvencelerin yeterli olup olmadığına, bu tedbir aracılığıyla elde edilen verilerin ceza yargılamasındaki yerine dair değerlendirmeler yer alacaktır.

Anahtar Kelimeler: Önleme amaçlı iletişimin denetlenmesi, Telekomünikasyon, Delil, Tedbir, Haberleşme Hürriyeti

Abstract

The measures of monitoring communication for preventive and intelligence purpose, as well as the measure of monitoring communication for judicial purposes, impose restrictions on the same right, but the conditions and purposes of these measures, including the authority making the decision, are distinct from each other. While the measure of monitoring communication for judicial purposes, when implemented with a decision taken in accordance with the law, results in data that hold evidential

value, the data obtained from the measure of monitoring communication for preventive and intelligence purposes, regardless of the lawfulness of the decision, cannot be used as evidence due to its nature and purpose. There exists a legal ambiguity in the classification of this data. Provisions regarding the measure of monitoring communication for preventive and intelligence purposes are regulated in special laws and have not been consolidated. The presence of these measures in different laws has led to significant interpretational differences and, consequently, diverse opinions in legal doctrine. Moreover, the continuous amendments to the legislation regulating these measures, coupled with the omission of references to repealed laws in research studies, have contributed to academic misinformation. This study will encompass evaluations regarding the conditions for the monitoring of preventive communication, the adequacy of safeguards ensuring the legality of intervention, and the place of data obtained through this measure in criminal proceedings.

Keywords: Preventive Communication Surveillance, Telecommunications, Evidence, Precautionary, Freedom of Communication

GİRİŞ

Devletin, varlığını ve egemenliğini koruma veya başka bir vatandaşının hakkının gasp edilmesini önleme görevini yerine getirirken, hükümlerlik yetkisini; mecbur kaldığı müddetçe, belirlilik ilkesine (ÖZPOLAT, 2018) uygun bir kanun aracılığıyla ve kısıtlayacağı hak ile ölçülü olmak kaidesiyle kullanabilir. Bu yetkinin kullanılma araçlarından birisi de iletişimin denetlenmesi tedbiridir. Devlet hükümlerlik yetkisini bu tedbir aracılığıyla suç işlenmesini önlemek amacıyla da kullanabilecektir. İşte bu amaçla uygulanan iletişimin denetlenmesi tedbirine, önleme ve istihbari amaçlı iletişimin denetlenmesi tedbiri denilmektedir.

Son yıllarda gelişen teknoloji ile birlikte iletişimin kolaylaşmasıyla devletlerin egemenliklerini tehdit eden terör ve suç örgütlerinin, örgüt içi haberleşmesi de kolaylaşmıştır. Devletin egemenliğini veya vatandaşının hak ve özgürlüklerini koruması ödevi dolayısıyla bu haberleşmeleri denetlemesi ihtiyacı doğmuştur (TAŞKIN, 2013: 31)Önleme amacıyla uygulanan bu tedbir adli amaçlı yapılan denetlemedeki kadar katı sınırlar içerisinde yapılmayacaktır. Sonuç olarak denetlenen kişi hiçbir suçun süjesi de olmayabilir. Dolayısıyla bu tedbirin uygulanmasının demokratik kurallar içerisinde sınırlandırılması gerekmektedir (AİHS)

Kamu gücü vasıtasıyla iletişimin denetlenmesi, Avrupa İnsan Hakları Sözleşmesi (AİHS, 1950) 8. madde özel ve aile hayatına saygı hakkı ile T.C. Anayasası (AY, 1982) 20. Maddesi özel hayatın gizliliğine ve AY 22. maddesinde düzenlenmiş bulunan haberleşme hürriyetine müdahale niteliğindedir. Hukuk devletinin ilkelerinden olan, temel hak ve özgürlüklerin güvence altına alınmış olmasının gereği olarak; temel hak ve özgürlüklere müdahalenin vatandaşın bileceği şekilde belirli ve yasa ile düzenlenmiş bulunması şarttır. Anayasaya göre olağanüstü haller ayrı tutulmak şartıyla temel hak ve özgürlüklere müdahale ancak kanun hükmüyle ve hakkın özüne dokunulmadan yapılabilmektedir.

AIHS'e göre devlet bu denetlemeyi ulusal güvenlik, kamu güvenliği, ülkenin ekonomik refahı, düzenin korunması, suç işlenmesinin önlenmesi, sağlığın veya ahlakın veya başkalarının hak ve özgürlüklerinin korunması gerektiği hallerde yasayla öngörüldüğü sürece gerçekleştirebilecektir (AIHS). Avrupa İnsan Hakları Mahkemesi'nin (AIHM) içtihatlarına göre tedbire başvurulmasının zorunlu olması, nedeninin meşru bir amaca dair olması, tedbirin orantılılık ilkesine aykırı olmaması, düzenlenen kanunun vatandaş tarafından ulaşılabilir, anlaşılacak kadar açık ve öngörülebilir olması gerekmektedir (Kruslin v. Fransa, 1990). Ayrıca müdahalenin kanunla düzenlenmiş olması yeterli değildir, demokratik toplumda devletin müdahalesinin gerekli hale gelmiş olması şarttır (AIHM, Malone v. Birleşik Krallık, 1984)

AY madde 22'ye göre ise iletişimin denetlenmesi istisnai olarak millî güvenlik, kamu düzeni, suç işlenmesinin önlenmesi, genel sağlık ve genel ahlâkın korunması veya başkalarının hak ve özgürlüklerinin korunması sebeplerinden biri veya birkaçı doğması halinde hâkim kararı ile gecikmesinde sakınca bulunan hallerde ise yetkili merciin yazılı emri ile yapılabilecektir. Hâkimin onayına 24 saat içerisinde sunulması ve hâkimin bu talep hususunda 48 saat içerisinde karar alması gerektiği belirtilmiştir (AY, 1982) Böylece kanunla dahi yetkili merciin, görevi kötüye kullanma amacıyla hâkim kararı olmaksızın uzun süreli önleme amaçlı iletişimin denetlenmesi tedbirini uygulayamayacak olması anayasa ile teminat altına alınmıştır.

YÖNTEM

Bu çalışma hazırlanırken çalışma konusu tabiatı gereği tedbirin uygulandığı şahısların kimler olduğu bilinemeyeceği ve bu sebeple şahıslar çalışmaya dâhil edilemeyeceği için nitel araştırma yöntemlerinden doküman analizi kullanılarak hazırlanmıştır. Araştırmada Türkiye'deki mevcut mevzuatın ne olduğu ve yeterliliği, Yargıtay ve Avrupa İnsan Hakları Mahkemesi tarafından verilmiş yargı kararları ile birlikte incelenerek değerlendirmede bulunulmuştur. Aynı zamanda çalışma içerisinde öncelikle temel normlara değinilmiş ardından detaylı kanun ve yargı kararı incelemesi yapılarak tûmdengelim yöntemi tercih edilmiştir. Konu ceza muhakemesine ilişkindir. Bu sebeple çalışmanın bazı kısımlarında, ceza muhakemesi ile benzerlik gösteren özel hukuk usulü ile kıyaslama yapılarak analogik yaklaşımdan yararlanılmıştır.

BULGULAR

1. ÖNLEME VE İSTİHBARİ AMAÇLI İLETİŞİMİN DENETLENMESİ TEDBİRİ KOŞULLARI

Adli amaçlı iletişimin denetlenmesi tedbiri de önleme amaçlı iletişimin denetlenmesi tedbiri de özel hayatın gizliliği ve haberleşme hürriyeti haklarına müdahale niteliğinde olmakla birlikte; adli amaçlı iletişimin denetlenmesi tedbiri delil elde etme amacıyla yerine getirilmekte, önleme amaçlı iletişimin denetlenmesi tedbirinde ise delil elde etme amacı bulunmamaktadır (ŞAHİN, 2007).

1.1. ÖNLEME AMAÇLI İLETİŞİMİN DENETLENMESİ TEDBİRİNDE ŞÜPHE DERECESESİ

Adli amaçlı iletişimin denetlenmesi tedbirine başvurulması için somut delillere dayanan kuvvetli suç şüphesinin varlığı (Ceza Muhakemesi Kanunu [CMK], 2004) şarttır. Önleme amaçlı iletişimin denetlenmesi tedbirinde ise bir şüphe oranı öngörülmemiş olup müdahalenin gerektiğine dair takdir yetkisi kararı almaya veya emri vermeye yetkili mercii eline bırakılmıştır.

1.2. ÖNLEME AMAÇLI İLETİŞİMİN DENETLENMESİ TEDBİRİNİN ÜLKE GENELİNDE UYGULANAMAMASI

Adli amaçlı iletişimin denetlenmesi tedbiri ülke genelinde alınamayacak bir tedbir olup, bu tedbire nazaran daha yumuşak koşullar altında alınabilecek olan önleme amaçlı iletişimin denetlenmesi tedbirinin de ülke genelinde uygulanması (ŞAHİN, 2007) yetkinin istisnailiği dolayısıyla hukuk devleti ile ters düşecektir.

Yargıtay 9. Ceza Dairesi bir kararında “Anılan yasal düzenlemelerin amaç, kapsam ve gerekçesi birlikte nazara alınıp değerlendirildiğinde; amacı ne olursa olsun hiçbir kuruma demokratik bir hukuk devleti olan Türkiye Cumhuriyeti'nde yaşayan insanlar şüpheli görülerek **Ülke genelini kapsayacak şekilde yetki verilemeyeceği**, anılan kanunların ilgili maddeleri gereğince talepte bulunan kolluk birimlerinin bulundukları yerler itibarıyla yetkili olan ve 5271 sayılı CMK'nın 250. maddesinin 1. Fıkrasına [Mülga: 2/7/2012-6352/105 md] göre kurulan ağır ceza mahkemesi üyelerinin kendi yargı çevreleri ile ilgili karar vermeleri gerektiği, sınırsız bir yetki verilmesi suretiyle iletişimin tespit edilerek dinlenilmesine karar verilemeyeceği, yasa koyucunun amacının da bu olduğu açıktır.” (Yargıtay 9. Ceza Dairesi, E. 2008/874, K.2008/7160, 04.06.2008) diyerek önleme amaçlı iletişimin denetlenmesi tedbirinin ülke genelinde alınamayacağına değinmiştir.

1.3. TEDBİRİN UYGULANACAĞI KİŞİ

Tedbirin uygulanacağı kişi hususunda bir kısıtlamaya gidilmemiştir. Tedbir herkese karşı uygulanabilmektedir (TAŞKIN, 2013: 226) 5275 sayılı Kanun'un “Hükümlünün telefonla görüşme hakkı” kenar başlıklı 66. Maddesine göre telefon görüşmesi infaz kurumunun idaresince dinlenip, kayda da alınabilmektedir. Anayasa Mahkemesine göre bu uygulama kurum dışı aramaların yapıldığı ücretli telefonlar için geçerlidir. Kurum içi ziyaretlerdeki telefonların dinlenmesi bu kapsamda değildir. Şahsın avukatı veya tanıklıktan çekinebilecek kişiler ile yaptığı görüşmeler adli amaçlı uygulanan tedbirdeki gibi denetim dışı bırakılmamıştır. Yani bunlar arasındaki iletişim de denetlenebilecektir.

1.4. ÖNLEME AMAÇLI İLETİŞİMİN DENETLENMESİ TEDBİRİNDE GÖREV, YETKİ, SÜRE ve KAYITLARIN SİLİNMESİ

Yargıtay 9. Ceza Dairesinin atıfta bulunduğu CMK 250. madde ilga edilmiş olup, şu anda önleme amaçlı iletişimin denetlenmesi tedbiri kararını vermeye yetkili hâkim, Ankara Ağır Ceza Mahkemesi üyesidir. Yürürlükteki mevzuatta, tedbiri uygulayacak üyenin yetki alanı çevresiyle ilgili bir sınırlama getirilmemiştir. Önleme amaçlı iletişimin denetlenmesi tedbiri bir şüphe derecesi ile de

sınırlandırılmamıştır. Dolayısıyla kararı verecek merciin müdahalenin gerekliliğine dair özel bilgi birikimi ve tecrübeye sahip olması gerekmektedir. (TAŞKIN, 2013: 234) Kanaatimizce kanun koyucu, bu tedbirin uygulanmasını bir yerden yürüterek karar merciin bu donanımına yeterince sahip olmasını sağlamayı hedeflemiştir.

Önleme amaçlı iletişimin denetlenmesi tedbiri, genel olarak; 2559 sayılı Polis Vazife ve Salâhiyet Kanunu, 2803 sayılı Jandarma Teşkilat, Görev ve Yetkileri Kanunu, 2937 sayılı Devlet İstihbarat Hizmetleri ve Milli İstihbarat Teşkilatı Kanunu’nda düzenlenmiştir. Üç kanun da hangi hallerde hangi merciin önleme amaçlı iletişimin denetlenmesi tedbirinden elde edilen verileri başvurulacağına işaret etmiştir. Her merciin kendi görev alanı dolayısıyla bu kararı verebileceğine işaret edilmiş olup casusluk suçları hususunda bu tedbirin uygulanmasına yalnızca Milli İstihbarat Teşkilatı (MİT) tarafından başvurulabilecektir (Polis Vazife ve Salâhiyet Kanunu [PVSK], 1934; Jandarma Teşkilat, Görev ve Yetkileri Kanunu [JTGYK], 1983). Bununla birlikte MİT ve Polis Teşkilatının sorumluluk alanı ülke geneli iken, Jandarma Teşkilatının sorumluluk alanı polis görev sahası dışı olup, bu alanlar il ve ilçe belediye hudutları haricinde kalan veya polis teşkilatı bulunmayan yerler ile sınırlıdır (JTGYK, 1983) Her yetkili merci önleme amaçlı iletişimin denetlenmesi tedbiri emrini kendi sorumluluk sahası içerisinde verebilir. Bunlarla birlikte vali ve kaymakamların suçun işlenmesini önleme ödevi olmasına karşın bu makamlara yazılı emir verme yetkisi tanınmamıştır (TAŞKIN, 2013: 237)

Gecikmesinde sakınca bulunan hallerde bu karar; 2559 sayılı kanuna göre Emniyet Genel Müdürünün, Emniyet Genel Müdürlüğü İstihbarat Dairesi Başkanının veya bilişim suçlarıyla sınırlı olmak üzere bilişim suçları ile ilgili daire başkanının yazılı emriyle, 2803 sayılı kanuna göre Jandarma Genel Komutanı veya istihbarat başkanının yazılı emri ile , 2937 sayılı kanuna göre Teşkilat Başkanı veya yardımcısının yazılı emri ile verilebilir.

Yazılı emirler hangi merci tarafından verildiği fark etmeksizin 24 saat içerisinde hâkime sunulmalıdır. MİT başkanı veya yardımcısının kendisine sunduğu karar ile ilgili hükmünü hâkim 24 saat içerisinde vermelidir. Diğer yetkililerin verdikleri kararlar ile ilgili hâkimin karar vermesi gereken süre hususunda daraltılmaya gidilmemiş anayasanın koyduğu üst sınır kabul edilerek 48 saat içerisinde hâkimin karar vermesi gerektiği belirtilmiştir (PVSK, 1934; JTGYK, 1983; DİHMİTK, 1983).

Her üç merciin verdiği tedbir emri için de sürelere uymamanın veya hâkimin onay vermemesinin yaptırımı tedbirin derhal kaldırılmasıdır. Bu halde elde edilen veriler en geç 10 gün içerisinde imha edilecektir. Bu imha edilmenin bir tutanakla tespit edilmesi ve denetimde bu tutanağın ibraz edileceği belirtilerek, önleme amaçlı iletişimin denetlenmesi tedbiri uygulanırken, uygulamayı yapan merciin denetlemeye tabi olduğuna da işaret edilmiştir.

Tedbir kararında “tedbirin türü, kapsamı ve süresi ile tedbire başvurulmasını gerektiren nedenler” bulunmak zorundadır (PVSK, 1934). Tedbir kararı kim tarafından alınmış olursa olsun elde edilen verilerin saklanması ve korunmasında gizlilik ilkesi geçerlidir.

Üç merciin verdiği kararlar da en fazla üç ay için verilebilir; bu süre aynı usulle üçer ayı geçmeyecek şekilde en fazla üç defa uzatılabilir. Ancak, terör örgütünün faaliyeti çerçevesinde devam eden tehlikelere ilişkin olarak gerekli görülmesi halinde, hâkim üç aydan fazla olmamak üzere sürenin müteaddit defalar uzatılmasına karar verebilir. MİT başkanı veya yardımcısının talebi veya emri üzerine

alınan tedbir kararının uygulanması casusluk faaliyetlerini ortaya çıkarma amacıyla yapılması halinde gerekli görüldüğü takdirde hâkim tarafından üç aydan fazla olmamak üzere müteaddit defalar uzatılmasına karar verilebilecektir (DİHMİTK, 1983).

Denetlemedeki iletişime dair işlemler ve dinlemeler Bilgi Teknolojileri ve İletişim Kurumu (BTK) tarafından yapılır. Kanunda geçen sürenin sona ermesi halinde veya tedbirin uygulanması faydasız hale gelmişse denetlemeye son verilir (YENİSEY ve NUHOĞLU, 2023: 305). Denetlemenin sonlandırılması halinde elde edilen veriler de 10 gün içerisinde imha edilecektir. Tedbirin mevzuattaki usullere aykırı olarak uygulanması halinde, uygulayan kamu görevlisi veya kamu görevlileri ceza (TCK hükümleri), tazminat ve disiplin yaptırımıyla karşı karşıya kalacaktır (TAŞKIN, 2013: 263)Bu da tedbiri uygulayanların denetime tabi olduğunu gösterir.

2. KEYFİLİĞİ ÖNLEYİCİ GÜVENCELER PROBLEMİ

Önleme amaçlı iletişimin denetlenmesi tedbirinde şüphe derecesinin belirli olmaması tedbirin niteliğinden kaynaklanmaktadır. Bu durumda tedbirin uygulanması belirlilik ilkesiyle zıt düşecek, dolaylı olarak adil yargılanma hakkına da aykırı olacaktır. Çünkü denetlenenin, kendisinin denetlenmesi için bir sebebin bulunmadığı, dolayısıyla denetlemenin haksız olduğu, iddiasıyla yargıya başvurusu halinde bu iddiasını kanıtlaması imkânsızlaşmış olacaktır. Denetleme gücünü elinde bulunduran sınırlandırılmamış merci tedbirin nedenini açıklamak zorunda olsa da adli amaçlı iletişimin denetlenmesindeki gibi hangi somut emarelere dayandığını göstermek zorunda değildir. Nitekim AİHM içtihatlarına göre de yasakla çizilmiş bir had bulunmasa da yasayla kapsam açısından daraltmaya gidilmelidir (AİHM, Malone v. Birleşik Krallık; 1984).

Adli amaçlı iletişimin denetlenmesi tedbirinde olduğu gibi önleme amaçlı iletişimin denetlenmesi tedbirinde denetlenecek kişinin kimliğinin belirli olması da şart değildir. Ancak bunun sebebi teknolojik gelişmelerden faydalanan şahsın kimliğinin belirlenmesinin müthiş zor olmasıdır. Tedbirin düzenlendiği her üç kanunda da “belirlenebilenler ve” şeklinde düzenleme yapılmış olup *Taşkın*’a göre (2013: 240) ‘ve’ bağlacından sonrası kararda bulunması zorunlu, öncesi ise ihtiyari unsurlardandır. Ancak kanaatimizce kanun koyucunun ‘ve’ bağlacı kullanmış olması kasıtlı olup belirleme yapılabildiyse denetlenenin kimliğinin tedbir kararında yer alması zorunludur.

Tedbirin uygulanması sonucunda, denetlenen direkt olarak kendisine bir müeyyide uygulanacak olması ihtimaliyle muhatap değildir. Kanunun belirlilik ilkesine uygun olması gerekliliği denetlenenin denetlendiğini bilmesi gerektiği manasına gelmez. Denetlenenin izlendiğinden haberdar olması halinde suç önleme amacı yerine gelmeyecektir. AİHM de bu görüşe katılmakta olup ayrıca bireylerin denetlenip denetlenmediğini öğrenmek için başvuru yapmasının imkân sağlanmamasının hukuka aykırı olmayacağına kanaat getirmiştir (DUTERTRE, 2017: 304).

Ayrıca mevzuatta önleme amaçlı iletişimin denetlenmesi tedbirine en son başvurulacağına dair bir hüküm bulunmamaktadır. Buna dair bir düzenleme olmaması akıllara her an bu tedbire başvurulabileceğini getirebilir. Ancak anayasa ile teminat altına alınan ölçülülük ilkesince adli amaçlı iletişimin denetlenmesi tedbirindeki gibi zorunlu olmadıkça önleme amaçlı iletişimin denetlenmesi tedbirine de başvurulamayacaktır (YENİSEY ve NUHOĞLU, 2023: 304)

Bir diğer güvence problemi ise uygulanması tedbirinin denetlenmesi problemidir. Nitekim AİHM tarafından Klass kararında da değinildiği üzere denetim altında olmayan kararlar, hukuka uygun olarak verilmiş olsa da denetlenmediği için müdahale yetkisini elinde bulunduran merciin kötüye kullanımına açık olduğundan hukuka aykırı olacaktır (AİHM, Klass v. Almanya, 06.09.1978) Denetlemenin yine kamu gücünü elinde bulunduran bir makam aracılığıyla yapılması, keyfiyetin önüne geçilmesi açısından sağlıklı sonuç vermesi güçtür. Ülkemizde denetleme adli ve idari yargı denetimine tabi olmakla birlikte BTK, Devlet Denetleme Kurumu'nun (DDK) denetimine de tabidir. Ancak iki kurum da cumhurbaşkanlığına bağlı olup aynı hiyerarşik üste tabi olan iki makamdan birinin diğerini denetlemesi hukuka uygun olsa da tarafsızlık açısından şüpheli kalacaktır.

3. ELDE EDİLEN VERİLERİN SUÇLARIN SORUŞTURMASI VE KOVUŞTURULMASINDA KULLANILMASI SORUNU

Önleme amaçlı iletişimin denetlenmesi tedbiri ile elde edilen veriler polis tarafından 2559 sayılı Polis Vazife ve Salâhiyet Kanununun ek 7. madde, jandarma tarafından 2803 sayılı Jandarma Teşkilat, Görev ve Yetkileri Kanununun ek 5. madde, MİT tarafından 2937 sayılı Devlet İstihbarat Hizmetleri ve Milli İstihbarat Teşkilatı Kanunu 4. Maddede sayılan amaçlar için kullanılabilir (TAŞKIN, 2013, : 226-232). Elde edilen veriler kanunda verilen amaç dışında kullanılamayacağı net bir şekilde belirtilmiştir. Kanunların hiçbirinde bu tedbir ile elde edilen verilerin delil olarak kullanılabilirine dair bir hüküm bulunmamaktadır.

Eryılmaz'a göre , (2012: 536) tedbirin uygulandığı aşamada CMK 135. Madde kapsamındaki bir suçların gerçekleştiğine ilişkin delil elde edildiğinde CMK 138'e göre derhal cumhuriyet savcılığına bildirilmelidir. *Taşkın'a göre* (2013: 258) elde edilen bilgilerin soruşturma başlatılması için bildirilmesi halinde tedbir amacından sapabilecek, bildirilmemesi halinde ise suç işlendiğini gösteren kanıtları bilen yetkilinin suçu bildirmeme suçu işlediğinden söz edilecektir. Bununla birlikte *Taşkın'a göre* (2013: 261) denetleme zaten yapılmaktadır yani hakka müdahale zaten oluşmuştur, bu denetlemeden elde edilen verilerin soruşturma makamıyla paylaşılması ise ağır müdahale anlamına gelmeyecektir. Dolayısıyla elde edilen verilerin herhangi bir suça dair olması halinde de soruşturma makamına gizli olarak ihbar edilmelidir.

Kanaatimizce elde edilen verilere *delil* denilmesi terminolojik bir hatadır. Çünkü bu tedbirin amacı delil elde etmek değildir. Dolayısıyla elde edilen veriler hiçbir şekilde delil niteliği taşımayacaktır. CMK'da düzenlenen 138. maddenin yalnızca CMK 135. madde ile ilgili olduğu veya önleme amaçlı iletişimin denetlenmesi tedbirini de kapsadığı hususunda bir netlik yoktur. Önleme amaçlı alınacak olan tedbirin düzenlendiği mevzuatta da buna ilişkin bir düzenleme yapılmamıştır. CMK 138'in kıyasen uygulanmasında bir sakınca bulunmadığını düşünüyoruz. Bildirimin CMK 135. Madde 6. fıkrada sayılan suçlar açısından sınırlı tutulması da yerinde olacaktır. *Taşkın'ın görüşünün benimsenmesi* halinde her suç işlenmesi şüphesi mevcudiyetinde cumhuriyet savcısına bildirim yapılması gerekecektir. Bu da yaralama gibi basit hali şikâyeteye bağlı suçlarda dahi bu prosedür uygulanması anlamına gelir ki bu durum kişi özgürlüğüne ciddi bir müdahale anlamı taşır. Kanun koyucu tarafından bu hususta net bir düzenleme yapılması gerekmektedir.

Yargıtay Ceza Genel Kurulu bir kararında “*Bir ceza soruşturması başlatılmasına dayanak oluşturabileceğinde duraksama bulunmamaktadır... Önleme amaçlı iletişim tespiti ve denetlenmesine, Suç işlenmesinin ve kamu düzeninin bozulmasını önlenmesi amacıyla başvurulabilecek ceza soruşturma ve kovuşturmasında delil olarak kullanılamayacaktır.*” diyerek önleme amaçlı iletişimin denetlenmesi tedbirini sonucunda elde edilen verilerin delil olarak kullanılması da soruşturma başlatmak için kullanılabileceklerini belirtmiştir (Yargıtay Ceza Genel Kurulu, E.2011/9-83, K.2011/ 95, 17/05/2011)

Kanaatimizce Yargıtay’ın bu görüşü yerindedir: Elde edilen verilerin delil olarak kullanılamaması isabetli olmakla birlikte hiçbir şekilde kullanılamaması halinde “önlemenin” amacına ulaşması mümkün olsa da fazlasıyla etkisizleşecektir. Ayrıca bu verilerin hiçbir şekilde ihbara konu olmaması halinde terör veya suç örgütlerinin iletişim aracılığıyla yaptıkları faaliyetlerinin ayyuka çıkması kaçınılmazdır.

Bu tedbirle elde edilen veriler delil niteliğinde olmasa da medeni usul hukukundaki delil başlangıcı kavramına benzer özellik göstermektedir. Nitekim medeni usul hukukunda da, somut davada delil başlangıcının varlığının kabul edilmesi iddianın ispatı için yeterli görülmemektedir. Ceza yargılamasında da önleme amaçlı iletişimin denetlenmesi tedbirinde soruşturma için savcılığa yapılacak olan ihbar da şüphelinin cezalandırılması için yeterli olmayacak, savcılık tarafından delil toplanması gerekecektir. Sonuç olarak önleme amaçlı iletişimin denetlenmesi ile elde edilen verileri delil başlangıcı kavramıyla ifade etmenin yerinde olduğu kanısındayız.

Adli amaçlı iletişimin denetlenmesi tedbirini önleme amaçlı iletişimin denetlenmesi tedbirine göre daha sıkı şartlara tabi olup, önleme amaçlı iletişimin denetlenmesi tedbirinden elde edilen verilerin soruşturma veya kovuşturmada kullanılabilmesi halinde, CMK 135. Madde atıl hale gelecek delil elde etmek için de önleme amaçlı iletişimin denetlenmesi tedbirine başvurulacak bu da demokratik toplumda vatandaşın temel hak ve özgürlüklerine haksız müdahale edilmesi manasına gelecektir (ŞAHİN, 2007) . Ancak önleme amaçlı uygulanan tedbirle elde edilen hiçbir verinin savcılığa ihbar edilmemesi, tedbirin amacını gerçekleştirmeyi engeller. Bu tedbire istinaden yapılacak bir takipte bilgi ceza yargılamasında kullanılamasa da soruşturma yapılmasını gerektirecek verilerin gizli olmak kaidesiyle savcılık makamına ihbar edilmesi gerektiği husunda *Taşkın*’a katılmakla birlikte, *Eryılmaz*’ın belirttiği üzere bu ihbarın CMK m. 138 ile sınırlı olduğu kanaatindeyiz.

3.1. SORUŞTURMA VE KOVUŞTURMA AŞAMASINDA ÖNLEME AMAÇLI İLETİŞİMİN DENETLENMESİ TEDBİRİ KARARI

Taşkın’a göre (2013: 233) önleme amaçlı iletişimin denetlenmesi tedbirinde soruşturma ve kovuşturma aşamasında başvurulması mümkün değildir. Bu aşamalar dışında önleme amaçlı iletişimin denetlenmesi tedbirini alınabilecektir. Ancak burada şöyle bir problem meydana gelmektedir: soruşturma ve kovuşturma aşamasında kuvvetli suç şüphesi mevcut olmayan vakıda hem adli amaçlı hem önleme amaçlı iletişimin denetlenmesi tedbirine başvurulamayacaktır. Bu halde devlet, önlenmesi gereken bir vakıadan haberdar olamayacaktır. Kanaatimizce adli amaçlı iletişimin denetlenmesi kararı alınmadıkça basit şüphe dahi aranmayan önleme amaçlı iletişimin denetlenmesi tedbirini kararı verilmesinde bir beis yoktur.

Diğer bir husus CMK m. 332’deki Cumhuriyet savcısı, hâkim veya mahkeme tarafından yazılı olarak istenen bilgilerin verilmesi gerekliliği ile ilgilidir. *Taşkın*’a göre kanuna göre bu bilgilerin CMK m. 332

uyarınca verilmesi zorunludur. Ancak bu bilgileri elde eden cumhuriyet savcısı elinde kanıt olmamasına rağmen etkisinde kalarak iddianame hazırlama yoluna gidebilecektir; bununla birlikte bilgilerin medyaya sızdırılması da söz konusu olabilir, dolayısıyla önleme amaçlı uygulanan bu tedbirden elde edilen verilen CMK m. 332 anlamında istenmesini önleyici düzenleme yapılması şarttır.

SONUÇ VE TARTIŞMA

Hukukumuzda keyfiliği önleyici güvenceler yeterli düzeyde düzenlenmemiştir. Tedbirin kullanılması gerekliliğine dair kanaat, sınırlandırmadan yetkili mercilerin iradesine bırakıldığından soyut bir engel olarak kalmıştır. Bu yetkinin kötüye kullanıldığı hallerde uygulayanın, TCK kapsamında bir müeyyideyle karşılaşma ihtimali olsa da denetlemenin yeterli kanaatin oluşmamasına rağmen yapıldığının ispatı güç neredeyse imkânsızdır. Kaldı ki yetkili mercii tarafından dinlenildiğinden haberdar olmayan vatandaşın buna ilişkin bir iddia ortaya koyması da mümkün değildir. Dolayısıyla şüphe derecesi ile ilgili bir sınırlama yapılamasa da kanun koyucu tarafından kanaatin sınırlarının belirlenmesi veya kapsamın daha dar hale getirilmesi şarttır. Önleme amaçlı iletişimin denetlenmesi tedbirinden elde edilen verilere hukuki bir nitelendirme yapılması gerekmektedir. Kanaatimizce bu nitelendirmenin ‘delil başlangıcı’ olması sağlıklı bir seçenektir. Verilerin ceza yargılamasında delil olarak kullanılamayacağı hususu genel olarak kabul edilmiş olup kayda değer bir fikir ayrılığı bulunmamaktadır. Bununla birlikte CMK m. 138’in kıyasen uygulanmasını gerektirmeyecek ölçüde ve CMK m. 332’ye dayanılarak önleme amaçlı iletişimin denetlenmesinde elde edilen verilerin kişi hakkına zarar verecek şekilde talep edilmesini önleyecek bir kanuni düzenleme yapılması şarttır.

KAYNAKÇA

Avrupa Konseyi (1950), *İnsan Hakları Ve Temel Özgürlüklerin Korunmasına İlişkin Sözleşme (AİHS)*. https://www.echr.coe.int/Documents/Convention_TUR.pdf

Ceza Muhakemesi Kanunu (CMK), 5271 sayılı Kanun (2004).

Devlet İstihbarat Hizmetleri ve Milli İstihbarat Teşkilatı Kanunu, 2937 sayılı Kanun (1983).

Dutertre, G. (2017), *Avrupa insan hakları mahkemesi kararlarından örnekler*. Avrupa Konseyi Yayınları.

Eryılmaz, B. (2012), *Ceza muhakemesi hukuku dersleri*. Seçkin Yayıncılık.

Eşref Köse, B. No: 2017/38098 (Anayasa Mahkemesi, 3 Haziran 2020).

Jandarma Teşkilat, Görev ve Yetkileri Kanunu, 2803 sayılı Kanun (1983).

Klass ve diğerleri / Almanya. (1978, 6 Eylül). Erişim adresi: <https://hudoc.echr.coe.int/eng?i=001-57510>

Kruslin / Fransa. (1990, 24 Nisan). Erişim adresi: <https://hudoc.echr.coe.int/eng?i=001-57626>

Malone / Birleşik Krallık. (1984, 2 Ağustos). Erişim adresi: <https://hudoc.echr.coe.int/eng?i=001-57533>

Özpolat, H. (2018), Anayasa Mahkemesi'nin bireysel başvuru kararlarında maddi anlamda kanun kriteri. *Türkiye Adalet Akademisi Dergisi*, 33, 609–622.

Polis Vazife ve Salahiyet Kanunu (PVSK), 2559 sayılı Kanun (1934).

Şahin, C. (2007), Telekomünikasyon yoluyla iletişimin denetlenmesi: Yargıtay kararları çerçevesinde bir değerlendirme. *Ankara Hacı Bayram Veli Üniversitesi Hukuk Fakültesi Dergisi*, 11(1), 1095–1112.

Taşkın, M. (2013), *Adli ve istihbari amaçlı iletişimin denetlenmesi*. Seçkin Yayıncılık.

Türkiye Büyük Millet Meclisi. (1982). *Türkiye Cumhuriyeti Anayasası* (Kanun No: 2709). Resmî Gazete.

Yargıtay 9. Ceza Dairesi, 2008/874 E., 2008/7160 K. (4 Haziran 2008).

Yargıtay Ceza Genel Kurulu, 2011/9-83 E., 2011/95 K. (17 Mayıs 2011).

Yenisey, F., Nuhoglu, A. (2023), *Ceza muhakemesi hukuku*. Seçkin Yayıncılık.

Televizyon Yayıncılığında İçerik Denetimi Ve Etik İhlaller: Türkiye Örneğinde Bir Değerlendirme

Ayşe Nilüfer Yılmaz Atay¹

¹E-mail ayseniluferyilmaz@gmail.com; Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Ankara / Türkiye.

Özet

Televizyon yayıncılığı, geniş kitlelere ulaşabilme kapasitesi nedeniyle toplumsal algının şekillenmesinde önemli bir rol üstlenmektedir. Bu durum, televizyon içeriklerinde etik ilkelere uygun yayıncılık anlayışını gerekli kılmaktadır. Çalışmada televizyon yayıncılığında içerik denetimi ve etik ihlaller incelenmiştir. Araştırmada nitel yöntemlerden doküman incelemesi kullanılmış; medya etiği, RTÜK düzenlemeleri ve güncel örnek olaylar değerlendirilmiştir. İnceleme sonucunda haberlerin magazinleştirilmesi, özel hayatın ihlali, çocukların yeterince korunamaması, ayrımcı temsiller ve afet dönemlerinde etik dışı yayıncılık uygulamalarının öne çıkan sorun alanları olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca etik ihlallerin yalnızca bireysel yayın hatalarından değil; reyting baskısı, ekonomik kaygılar ve medya sektöründeki rekabet ortamından da kaynaklandığı sonucuna ulaşılmıştır. Bu kapsamda etik yayıncılığın güçlendirilmesi için hukuki denetim mekanizmalarının yanında medya kuruluşlarının özdenetim sistemlerinin geliştirilmesi gerektiği değerlendirilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Etik İhlaller, İçerik Denetimi, Medya Etiği, RTÜK, Televizyon Yayıncılığı.

Abstract

Television broadcasting plays an important role in shaping public perception due to its ability to reach large audiences. This situation makes ethical broadcasting principles essential in television content. This study examines content regulation and ethical violations in television broadcasting. In the research, document analysis, one of the qualitative research methods, was used, and media ethics, RTÜK regulations, and current case examples were evaluated. The findings indicate that tabloidization of news, violation of privacy, inadequate protection of children, discriminatory representations, and unethical broadcasting practices during disaster periods are among the major ethical problems. In addition, it was concluded that ethical violations arise not only from individual broadcasting mistakes but also from rating pressure, economic concerns, and competition within the media sector. In this context, it is argued that improving self-regulation mechanisms of media organizations is necessary alongside legal supervision.

Keywords: Content Regulation, Ethical Violations, Media Ethics, RTÜK, Television Broadcasting.

GİRİŞ

Kitle iletişim araçları, toplumsal yapının şekillenmesinde önemli bir rol üstlenmektedir. Bu araçlar arasında televizyon, geniş kitlelere aynı anda ulaşabilme kapasitesi ve görsel-işitsel etkisi sayesinde diğer iletişim araçlarından ayrılmaktadır. Televizyon yayıncılığı yalnızca bilgi ve eğlence sunan bir araç değil, aynı zamanda bireylerin düşünce biçimlerini, toplumsal algılarını ve kültürel değerlerini etkileyen güçlü bir iletişim alanı olarak değerlendirilmektedir. Bu nedenle televizyon yayıncılığı, etik ve hukuki boyutları bulunan toplumsal bir faaliyet niteliği taşımaktadır.

Günümüzde televizyon yayınlarında haberlerin magazinleştirilmesi, özel hayatın gizliliğinin ihlal edilmesi, çocukların yeterince korunamaması, ayrımcı temsiller ve afet dönemlerinde sansasyonel yayın dili gibi çeşitli etik sorunların ortaya çıktığı görülmektedir. Özellikle reyting baskısı ve medya sektöründeki yoğun rekabet ortamı, yayın içeriklerinin hazırlanış sürecinde etik ilkelerin zaman zaman geri plana itilmesine neden olmaktadır. Bu durum, televizyon yayıncılığında içerik denetimi ve medya etiği tartışmalarını daha önemli hale getirmektedir.

Türkiye’de radyo ve televizyon yayıncılığı, 6112 sayılı Kanun çerçevesinde düzenlenmekte ve Radyo ve Televizyon Üst Kurulu (RTÜK) tarafından denetlenmektedir. RTÜK, yayın hizmetlerinin kamu yararı, çocukların korunması ve toplumsal değerlerin gözetilmesi ilkeleri doğrultusunda yürütülmesini amaçlamaktadır. Ancak uygulamada etik ihlallerin tamamen önlenemediği ve mevcut denetim mekanizmalarının zaman zaman yetersiz kaldığı yönünde tartışmalar bulunmaktadır.

Bu çalışmada televizyon yayıncılığında içerik denetimi ve etik ihlaller ele alınmıştır. Çalışmada televizyon yayıncılığının toplumsal etkisi, RTÜK’ün denetim rolü ve televizyon içeriklerinde ortaya çıkan başlıca etik sorun alanları incelenmiştir. Ayrıca etik ihlallerin yalnızca bireysel yayın hatalarından değil, ekonomik kaygılar ve medya sektöründeki yapısal dönüşümlerden de etkilendiği değerlendirilmektedir.

YÖNTEM

Bu çalışmada nitel araştırma yöntemlerinden doküman incelemesi yöntemi kullanılmıştır. Araştırma kapsamında medya etiği, televizyon yayıncılığı ve içerik denetimi alanında hazırlanmış akademik çalışmalar, RTÜK düzenlemeleri, ilgili mevzuat hükümleri ve güncel örnek olaylar incelenmiştir. Çalışmada özellikle televizyon yayınlarında ortaya çıkan etik ihlaller; haberlerin magazinleştirilmesi, özel hayatın gizliliğinin ihlali, çocukların korunması, reklam etiği ve afet yayıncılığı başlıkları çerçevesinde değerlendirilmiştir.

Elde edilen veriler içerik analizi yöntemiyle yorumlanmış ve televizyon yayıncılığında etik sorunların ortaya çıkış nedenleri incelenmiştir. Ayrıca yayıncılık faaliyetlerinde etik ilkeler ile ifade özgürlüğü arasındaki ilişki değerlendirilerek içerik denetimi uygulamalarının toplumsal etkileri analiz edilmiştir.

BULGULAR

Araştırma bulguları, televizyon yayıncılığında etik ihlallerin farklı biçimlerde ortaya çıktığını göstermektedir. Özellikle haber içeriklerinde reyting kaygısıyla hareket edilmesi, yayınların magazinleştirilmesine ve kamuoyunun doğru bilgiye ulaşmasının zorlaşmasına neden olmaktadır. Görsel efektlerin ve dramatik anlatım biçimlerinin yoğun kullanımı, haberlerin gerçeklik algısını değiştirebilmekte ve tarafsız yayıncılık anlayışını zedeleyebilmektedir.

Çalışmada ayrıca özel hayatın gizliliğinin ihlali, televizyon yayıncılığındaki önemli etik sorunlardan biri olarak değerlendirilmiştir. Özellikle suç ve mağduriyet içerikli haberlerde kişilere ait görüntülerin ve özel bilgilerin açık şekilde paylaşılması, bireysel hakların ihlal edilmesine yol açabilmektedir. Bununla birlikte çocukların televizyon içeriklerinden yeterince korunamaması da dikkat çeken bir diğer sorun alanıdır. Çocuklara yönelik şiddet içerikleri, hassas görüntüler ve kimlik bilgilerinin paylaşılması, etik yayıncılık ilkeleriyle bağdaşmamaktadır.

Araştırma bulguları, afet ve kriz dönemlerinde etik ihlallerin daha görünür hale geldiğini de ortaya koymaktadır. Özellikle doğrulanmamış bilgilerin paylaşılması, sansasyonel başlıkların kullanılması ve mağdur kişilerin hassasiyetlerinin yeterince gözetilmemesi, toplumsal kaygı ve paniğin artmasına neden olabilmektedir. Ayrıca reklam ve ticari içeriklerde toplumsal değerlerin ticari kaygılar doğrultusunda kullanılması da etik tartışmalara yol açmaktadır.

Elde edilen veriler doğrultusunda televizyon yayıncılığındaki etik ihlallerin yalnızca bireysel yayın hatalarından kaynaklanmadığı; ekonomik kaygılar, rekabet ortamı, dijitalleşme süreci ve reyting baskısının da bu ihlaller üzerinde etkili olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

SONUÇ VE TARTIŞMA

Televizyon yayıncılığı, geniş kitlelere ulaşabilme kapasitesi ve görsel-işitsel etkisi nedeniyle toplumsal algının şekillenmesinde önemli bir rol üstlenmektedir. Bu nedenle televizyon yayınlarında etik ilkelerin korunması, yalnızca bireysel hakların değil aynı zamanda toplumsal değerlerin korunması bakımından da büyük önem taşımaktadır. Çalışmada elde edilen bulgular, televizyon yayıncılığında haberlerin magazinleştirilmesi, özel hayatın gizliliğinin ihlali, çocukların yeterince korunamaması, ayrımcı temsil biçimleri ve afet dönemlerinde sansasyonel yayın dilinin kullanılması gibi çeşitli etik sorunların öne çıktığını göstermektedir. Özellikle reyting kaygısıyla hazırlanan yayın içeriklerinin, kamuoyunun doğru ve tarafsız bilgiye ulaşmasını zorlaştırdığı görülmektedir.

Araştırma bulguları, televizyon yayıncılığındaki etik ihlallerin yalnızca bireysel yayın hatalarından kaynaklanmadığını ortaya koymaktadır. Medya sektöründeki ekonomik kaygılar, yoğun rekabet ortamı, dijitalleşme süreci ve izlenme oranı baskısı, yayın içeriklerinin hazırlanış sürecini doğrudan etkilemektedir. Bu durum, etik ilkelerin zaman zaman geri plana itilmesine neden olmakta ve kamu yararı yerine ticari kaygıların ön plana çıkmasına yol açabilmektedir. Özellikle kriz ve afet dönemlerinde doğrulanmamış bilgilerin paylaşılması, mağdur bireylerin hassas görüntülerinin yayımlanması ve korku

oluşturabilecek sansasyonel başlıkların kullanılması, etik yayıncılık anlayışı bakımından önemli sorunlar oluşturmaktadır.

Çalışmada ayrıca RTÜK'ün yayıncılık alanındaki düzenleyici ve denetleyici rolü değerlendirilmiştir. RTÜK tarafından uygulanan yaptırımların yayın ilkelerinin korunması bakımından önemli bir işlev gördüğü anlaşılmakla birlikte, etik sorunların yalnızca hukuki yaptırımlarla tamamen çözülemeyeceği sonucuna ulaşılmıştır. Çünkü yayıncılık alanındaki etik sorunların önemli bir kısmı yapısal nedenlerden kaynaklanmaktadır. Bu nedenle etik yayıncılığın güçlendirilmesi için yalnızca dış denetim mekanizmalarının değil, medya kuruluşlarının özdenetim sistemlerinin de geliştirilmesi gerekmektedir.

Bu kapsamda yayın politikalarının etik ilkelere uygun şekilde oluşturulması, çocukların ve hassas grupların korunmasına yönelik uygulamaların artırılması, doğruluk ilkesine dayalı habercilik anlayışının benimsenmesi ve medya okuryazarlığının geliştirilmesi önem taşımaktadır. Ayrıca medya çalışanlarının etik ilkeler konusunda bilinçlendirilmesi ve yayın kuruluşlarında etik odaklı kurumsal politikaların yaygınlaştırılması gerekmektedir. Sonuç olarak televizyon yayıncılığında etik, yalnızca mesleki bir tercih değil; bireysel hakların korunması, toplumsal hassasiyetlerin gözetilmesi ve sağlıklı bir kamusal iletişim ortamının sürdürülebilmesi açısından temel bir sorumluluk alanı olarak değerlendirilmelidir.

KAYNAKÇA

- Aksaçoğlu, A. G., & Yılmaz, B. (2007). Öğrencilerin televizyon izleme ve bilgisayar kullanma alışkanlıklarının okuma alışkanlıklarına etkisi. *Türk Kütüphaneciliği*, 21(1), 3-28.
- Ayten, A. (2013). Bir özdenetim aracı medya etik konseyi. *İstanbul Üniversitesi İletişim Fakültesi Dergisi*, 44, 1-17.
- Çelenk, S. (2010). Kadınların medyada temsili ve etik sorunlar. B. Çaplı & H. Tuncel (Ed.), *Televizyon Haberciliğinde Etik içinde* (ss. 229-236). Ankara Üniversitesi İLEF Yayınları.
- Çetin, İ. (2019). Televizyon reklamlarında cinsellik kullanımı üzerine etik inceleme: Hasbro yılbaşı reklamı örneği. *Aksaray Üniversitesi İletişim Dergisi*, 1(2), 156-180.
- Çiftçi, H. (2017). Televizyon haberciliğinde etiksel bir sorun olarak magazinleşmenin topluma etkisi. *The Journal of Academic Social Science Studies*, 58, 475-487.
- Darendeli, F. (2017). Görsel-işitsel medya alanında idari yaptırımlar ve yayıncılık hukuku. *Erciyes İletişim Dergisi*, 5(1), 116-120.
- Dikmen, E. Ş. (2014). Türkiye'de televizyon yayıncılığının dönüşümü: Sosyal TV yayıncılığı. *Gümüşhane Üniversitesi İletişim Fakültesi Elektronik Dergisi*, 5, 425-432.
- Eşiyok, E. (2018). Türkiye'de reklamların denetimi: Reklam kurulu kararları üzerinden bir inceleme. *İnönü Üniversitesi Hukuk Fakültesi Dergisi*, 9(2), 593-606.
- Kafadar, O. (2017). RTÜK'ün çocuklara yönelik kararlarının çocuk ve televizyon ilişkisi yönüyle içerik analizi yöntemi ile incelenmesi. *Kesit Akademi Dergisi*, 3(10), 810-837.
- Koçer, M. (2013). Televizyon izleme alışkanlıkları ve motivasyonları: Kayseri örneği. *NWSA Humanities*, 8(2), 207-225.

- Küçükbasımacı, G. (2013). Elektronik çağda sözün satıcıları: Radyo ve televizyon. *Turkish Studies*, 8(4), 1063-1080.
- Özkan, Ö. (2019). Medyadaki etik sorunlardan biri olarak cinsiyet ayrımcılığı: Magazin basınından örnek haber incelemesi. *OPUS Uluslararası Toplum Araştırmaları Dergisi*, 10(17), 877-903.
- Serçelik, H., & Kasımoğlu, E. S. (2022). Yeni medyada etik ihlaller: İzmir depremi örneği. *International Journal of Social Sciences and Art Studies*, 1(1), 128-141.
- Tok, İ., Çakır, B., & Demir, A. (2025). Haber sitelerinde yer alan çocuk cinayeti haberlerinin sunumu ve etik ihlaller. *MEDIAJ*, 8(1), 200-234.
- Usta, E., & Yükseler, M. (2021). Afetlerde sosyal medya kullanımı ve etik ikilemler: İzmir Seferihisar depremi örneği. *Afet ve Risk Dergisi*, 4(2), 249-269.
- Yılmaz, A., & Biyan, Ö. (2023). Radyo ve televizyon yayıncılığında hukuki denetim ve RTÜK'ün rolü. *İstanbul Ticaret Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 22(47), 195-198.
- Zinderen, İ. E. (2020). Televizyon haber bültenlerinde görsel efekt kullanımının yarattığı etik sorunlar. *Gümüşhane Üniversitesi İletişim Fakültesi Elektronik Dergisi*, 8(1), 337-362.
- Zor, L. (2014). Medya etiği kapsamında özel hayatın ihlali konusu. *Akademik Bakış Dergisi*, 40, 1-12.

Resimli Çocuk Kitaplarının "Çok Kültürlülük" Bağlamında İncelenmesi: Sistemik Derleme Çalışması

Cemile Büşra KESELİ¹, Dr. Öğr. Üyesi Esra AKGÜL²

¹E-mail: 256153081@std.hku.edu.tr ; ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-0447-8728>; Hasan Kalyoncu Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Temel Eğitim Anabilim Dalı, Okul Öncesi Eğitimi Gaziantep / Türkiye.

²E-mail: esra.akgul@hku.edu.tr ; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8155-4181>; Hasan Kalyoncu Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Temel Eğitim Anabilim Dalı, Okul Öncesi Eğitimi Gaziantep / Türkiye.

Özet

Bu sistemik derleme çalışması, okul öncesi döneme hitap eden resimli çocuk kitaplarında çok kültürlülük temsillerini inceleyen akademik araştırmaları sistemik olarak derlemeyi amaçlamaktadır. Günümüzde artan göç hareketleri ve kültürel çeşitlilik, çocukların erken yaşlardan itibaren farklı kimlikler ve yaşam biçimleriyle temas etmesini kaçınılmaz kılmıştır. Bu durum, çocukların dünyayı algılama süreçlerini şekillendiren eğitim materyallerinin niteliğini önemli bir tartışma konusu hâline getirmiştir. Özellikle resimli çocuk kitapları, çocukların farklı kültürleri tanımaları, çeşitliliği anlamlandırmaları ve toplumsal farklılıklara ilişkin algı geliştirmeleri açısından önemli bir araç niteliğindedir.

Araştırmada, 2015–2025 yılları arasında yayımlanmış ve okul öncesi döneme yönelik resimli çocuk kitaplarında çok kültürlülük temasını ele alan akademik çalışmalar sistemik derleme yöntemiyle incelenmiştir. Tarama sürecinde Web of Science, Scopus, ERIC, YÖK Tez ve TR Dizin veri tabanlarından yararlanılmış; belirlenen dahil etme ve dışlama kriterleri doğrultusunda çalışmalar değerlendirilmiştir. Süreç boyunca PRISMA 2020 akış şeması temel alınmış ve tarama sonucunda ulaşılan çalışmalar aşamalı olarak elenerek araştırma kapsamına uygun olanlar seçilmiştir. Dahil etme aşamasında tüm kriterleri karşılayan toplam 16 çalışma araştırmaya dahil edilmiştir.

Çalışmanın bulgularının, çocuk edebiyatında çok kültürlülüğün nasıl temsil edildiğini ortaya koyması, mevcut literatürdeki eğilimleri belirlemesi ve alandaki araştırma boşluklarını görünür kılması beklenmektedir. Çalışmanın nihai sonuçları; öğretmen, araştırmacı ve ebeveynler için kültürel açıdan duyarlı kitap seçimi sürecine bütüncül ve özgün bir çerçeve sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Çok kültürlülük, kültürel temsil, okul öncesi dönem, resimli çocuk kitapları, sistemik derleme.

Abstract

This systematic review study aims to examine academic research investigating representations of multiculturalism in picture books intended for preschool children. Today, increasing migration movements and cultural diversity have made it inevitable for children to encounter different identities and ways of life from an early age. This situation has turned the quality of educational materials that

shape children's perceptions of the world into an important topic of discussion. In particular, picture books for children serve as an important tool for helping children recognize different cultures, make sense of diversity, and develop perceptions regarding social differences.

In this research, academic studies published between 2015 and 2025 that addressed the theme of multiculturalism in picture books for preschool children were analyzed through the systematic review method. During the screening process, the databases Web of Science, Scopus, ERIC, YÖK Thesis Center, and TR Dizin were utilized, and studies were evaluated in line with predetermined inclusion and exclusion criteria. Throughout the process, the PRISMA 2020 flow diagram was taken as a basis, and the studies identified through the search were gradually eliminated to select those appropriate for the scope of the research. At the inclusion stage, a total of 16 studies meeting all criteria were included in the review. The findings of the study are expected to reveal how multiculturalism is represented in children's literature, identify trends in the existing literature, and make visible the research gaps in the field. The final results of the study are anticipated to provide an original framework for teachers, researchers, and parents in guiding culturally sensitive book selection.

Keywords: Multiculturalism, picture books for children, preschool period, cultural representation, systematic review.

GİRİŞ

Son yıllarda hız kazanan küreselleşme ve göç hareketleri, toplumların kültürel yapısını giderek daha çeşitli hale getirmektedir (Banks, 2015; Vertovec, 2019). Erken çocukluk dönemi, bireylerin çevrelerini anlamlandırmaya başladıkları ve farklılıklara yönelik ilk tutumlarının şekillendiği kritik bir evredir (Killen & Smetana, 2015; Piaget, 1964). Okul öncesi dönemde çocuklar, dünyayı büyük ölçüde görseller ve hikâyeler aracılığıyla tanırlar (Nikolajeva, 2014). Bu bağlamda resimli çocuk kitapları, yalnızca dil gelişimini desteklemekle kalmayıp, çocukların farklı kültürleri tanımalarına önemli bir dayanak oluşturur (Nodelman, 2008). Bishop'un (1990) ifadesiyle çocuk kitapları, çocukların kendi yaşamlarını görebilecekleri bir "ayna" ve farklı hayatları keşfedebilecekleri bir "pencere" işlevi görerek kültürel temsil ve sosyal öğrenme açısından önemli bir zemin sunar (Derman-Sparks, 2013).

Araştırmanın Amacı ve Soruları

Bu araştırmanın temel amacı; okul öncesi döneme hitap eden resimli çocuk kitaplarındaki çok kültürlülük ve göç temsillerini konu alan akademik çalışmaları sistematik bir yaklaşımla incelemek ve alandaki mevcut literatürü bütüncül bir yaklaşımla ortaya koymaktır. Bu temel amaç kapsamında araştırmada şu sorulara cevap aranmaktadır:

1. Resimli çocuk kitaplarında göç olgusu hangi alt başlıklar altında ele alınmaktadır?
2. Resimli çocuk kitaplarında kültürel temsiller nasıl sunulmaktadır?
3. Göç süreçleri ve kültürel farklılıkları ele alan resimli çocuk kitaplarının biçimsel özellikleri nelerdir?
4. Yapılan çalışmalarda kitapların içerik özellikleri nelerdir?

Problem Durumu

Çok kültürlülük yaklaşımı, farklı kimliklerin eğitim materyallerinde dengeli ve görünür biçimde temsil edilmesini savunurken (Parekh, 2006); alan yazındaki bazı araştırmalar, çocuk kitaplarında kültürel çeşitliliğin her zaman nitelikli sunulmadığını, aksine farklılıkların yüzeysel ele alındığını veya kalıp yargıların öne çıktığını göstermektedir (Botelho & Rudman, 2009; Derman-Sparks, 2013). Türkiye

bağlamında bakıldığında ise, son yıllarda yoğunlaşan göç hareketleri eğitim ortamlarının çok kültürlü niteliğini belirginleştirmiştir. Millî Eğitim Bakanlığı verilerine göre okul öncesi kademesinde 100 binin üzerinde yabancı uyruklu çocuğun bulunması, kültürel çeşitliliğin sınıflarda doğrudan deneyimlenen bir gerçeklik haline geldiğini göstermektedir (MEB, 2023).

Buna karşılık ulusal alan yazındaki çalışmalar, çocuk kitaplarında çeşitliliğin henüz dengeli yansıtılmadığını ve geleneksel kalıpların tekrarlandığını ortaya koymaktadır (Karagöz, 2020; Şimşek & Yakar, 2018). Ayrıca mevcut literatürün büyük bir bölümü dil gelişimi ve bilişsel beceriler gibi pedagojik çıktılara odaklanarak kültürel temsil boyutunu ikincil planda bırakmakta (Nikolajeva, 2014); kültürel unsurları inceleyen çalışmaların çoğu ise belirli kitap örnekleri veya sınırlı temalar üzerinden dağınık bir görünüm sunmaktadır (Botelho & Rudman, 2009; Short, 2016). Bu durum, çocuk edebiyatındaki göç odaklı temsillerin genel eğilimlerini bütüncül bir gözle değerlendirmeyi zorlaştırırken, kitaplardaki mesajların çocukların anlam dünyasıyla nasıl ilişkilendirildiğini ve bu temsillerin kapsamlı bir sentezini sunan sistematik derleme çalışmalarının eksikliği alanda önemli bir eksiklik olarak dikkat çekmektedir (Gough, Oliver, & Thomas, 2017; Petticrew & Roberts, 2006).

Araştırmanın Önemi

Bu doğrultuda gerçekleştirilecek sistematik bir derleme çalışması, literatürdeki eğilimleri ve ortak bulguları sentezleyerek mevcut kuramsal birikimi netleştirmeyi hedeflemektedir (Gough ve ark., 2017). Araştırma, hangi temsillerin kalıp yargı riski taşıdığını ve hangi yaklaşımların daha kapsayıcı olduğunu ortaya koyarak öğretmenler, ebeveynler ve materyal geliştiriciler için önyargıdan uzak materyal seçiminde yol gösterici bir rehber sunması açısından önem arz taşımaktadır (Derman-Sparks, 2013; Short, 2016).

YÖNTEM

Araştırma Modeli

Bu araştırma, okul öncesi döneme yönelik resimli çocuk kitaplarındaki çok kültürlülük temsillerini inceleyen akademik çalışmaları ayrıntılı bir biçimde incelemek amacıyla, nitel araştırma yöntemlerinden sistematik derleme modeline uygun olarak tasarlanmıştır. Sistematik derleme; belirli bir araştırma sorusuna odaklanan mevcut literatürün, önceden yapılandırılmış protokoller ve nesnel seçim kriterleri çerçevesinde incelenerek sentezlendiği titiz bir metodolojik süreçtir (Fink, 2019; Gough, Oliver, & Thomas, 2017). Araştırma süreci, sistematik derleme çalışmalarında uluslararası bir kalite standardı olarak kabul edilen PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) protokolü rehberliğinde yapılandırılmıştır (Page ve ark., 2021). Bu kapsamda izlenen metodolojik aşamalar aşağıda özetlenmiştir:

- **Tanımlama (Identification):** "Çok kültürlülük", "çocuk edebiyatı" ve "resimli çocuk kitapları" anahtar kelimeleriyle Web of Science, Scopus, ERIC, YÖK Tez ve TR Dizin veri tabanlarında kapsamlı bir arama yapılmış ve toplam 219 çalışmaya ulaşılmıştır.
- **Tarama (Screening):** Elde edilen 219 kaydın başlıkları ve özetleri, dahil etme kriterleri ışığında gözden geçirilmiştir. Veri tabanlarına göre dağılım; Web of Science: 96, Scopus: 55, ERIC: 39, YÖK Tez: 18 ve TR Dizin: 11 şeklindedir.
- **Uygunluk (Eligibility):** İlk elemeyi geçen 116 makalenin tam metni incelenmiş; çocuk kitaplarını içermemesi, okul öncesi döneme odaklanmaması, çok kültürlülük temasını doğrudan ele almaması ya da tam metnine ulaşılamaması gibi nedenlerle 100 makale çalışma dışı bırakılmıştır.
- **Dahil Etme (Included):** Tüm kriterleri karşılayan ve derlemenin nihai veri kümesini oluşturan toplam 16 çalışma araştırmaya dahil edilmiştir.

Bu aşamalı süreç, veri seçiminde yanlılık riskini en aza indirerek araştırmanın bilimsel geçerlik ve güvenilirlik standartlarını yükseltmiştir (Liberati ve ark., 2009).

Veri Toplama Süreci

Araştırma verileri, 10.04.2026 ile 07.05.2026 tarihleri arasında Web of Science, Scopus, ERIC, YÖK Tez ve TR Dizin veri tabanları taranarak toplanmıştır. Tarama sürecinde hem Türkçe hem İngilizce anahtar kelimelerden yararlanılmıştır. Arama sırasında kullanılan İngilizce anahtar kelimeler; "children's literature", "cultural diversity", "multiculturalism", "kindergarten", "cultural representation", "early childhood", "picture books" ve "preschool" olarak belirlenmiştir. Türkçe literatür için ise; "çocuk edebiyatı", "resimli çocuk kitapları", "çok kültürlülük", "kültürel çeşitlilik", "göçmenler", "göç", "mülteciler", "kültürel temsil", "erken çocukluk", "okul öncesi" ve "anaokulu" anahtar kelimeleri kullanılmıştır.

Uluslararası veri tabanlarında kullanılan arama kombinasyonları şu şekildedir:

("children's literature" OR "picture books") AND (multiculturalism OR "cultural diversity" OR "cultural representation" OR diversity)

("children's literature" OR "picture books") AND (multiculturalism OR "cultural representation") AND (migration OR refugees OR immigrants OR identity) AND ("early childhood" OR preschool OR kindergarten)

Dahil Etme Kriterleri:

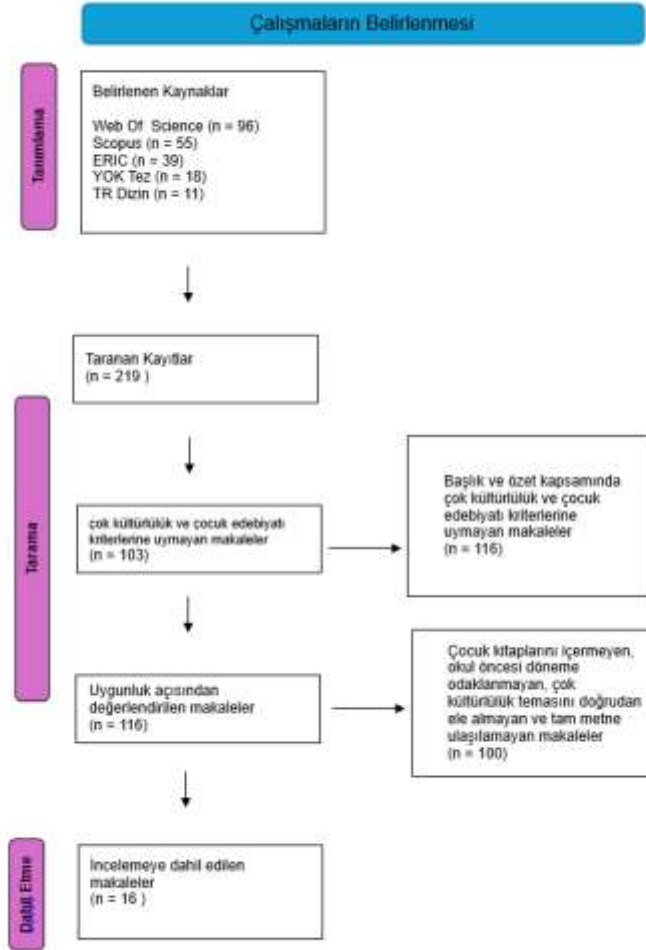
- Çalışmaların 2015–2025 yılları arasında yayımlanmış olması,
- Hakemli dergilerde yayımlanmış akademik makaleler olması,
- 0–6 yaş dönemine yönelik basılı çocuk kitaplarını incelemesi,
- Çok kültürlülük, kültürel çeşitlilik veya göç temalarını ele alması,
- Eğitim veya sosyal bilimler alanında yayımlanmış olması.

Dışlama Kriterleri:

- Herhangi bir çocuk kitabı incelemesi içermeyen, yalnızca kuramsal nitelikteki çalışmalar,
- Okul öncesi dönem dışındaki yaş gruplarına odaklanan çalışmalar,
- Tam metnine erişilemeyen çalışmalar,

- İngilizce ve Türkçe dışındaki dillerde yazılan çalışmalar.

• PRISMA AKIŞ SÜRECİ



PRISMA 2020 akış diyagramı temel alınarak oluşturulmuştur (Page ve ark., 2021).

Tablo 1. Dahil Etme ve Hariç Tutma Sonucu Ulaşılan Makaleler

Makale No	Yıl	Makale Başlığı	Yazar	Veri Tabanı	Odak Noktası Ve Kapsamı
M1.	2025	Amerikan Resimli Kitaplarında Çin Kültürünün Yazılı Ve Görsel Diller Aracılığıyla Yanlış Temsil Edilmesi	Wangbei	Scopus	Resimli Kitaplardaki Kültürel Klişeleri Ve Metin/Görsel Uyumsuzluğunu Eleştirel Bir Dille İnceler.
M2.	2024	Yeni Gelen Çocukların Kültürel Geçişlerini Çağdaş Kanada Resimli Kitaplarıyla Desteklemek	Sunny C. Li & Brittany Adams	Scopus	Göçmen Çocukların Yeni Bir Ülkeye (Kanada) Uyum Sürecinde Edebiyatın Bibliyoterapi Etkisine Odaklanır.
M3.	2022	Çocuk Edebiyatında Çok kültürlülüğün Ve Dilin Değeri: Eleştirel Bir İnceleme	Papadopoulou Rodosthenous	Scopus	Dilsel Çeşitliliğin Ve Çok Dilliliğin Bir Zenginlik Olarak Kitaplara Nasıl Yansıdığını Analiz Eder.

M4.	2022	Çocuk Edebiyatı Aracılığıyla Eleştirel Çok Kültürlülük Ve Kültürel Hegemonyaya Karşı Koyma	Ong & Pal	Scopus	Çocuk Edebiyatının Eleştirel İçerik Ve Tematik Analizi Vardır.
M5.	2019	Quellilâ, Göçün Zorlukları Ve Çağdaş İtalyan Çocuk Kitapları	Teresa Solis	Scopus	İtalyan Edebiyatında Göçün Zorluklarının (Dil Bariyeri, Özlem) Çocuklara Nasıl Anlatıldığını İnceler.
M6.	2015	Anaokulu Öğrencilerine Çok Kültürlü Edebiyat Aracılığıyla İrksal Çeşitliliği Öğretmek: Kore'deki Bir Anaokulu Sınıfında Bir Vaka Çalışması	Sou Jung Kim	Scopus	Koreli Anaokulu Öğrencilerini Toplu Okuma Etkinliği Sırasında İrksal/Kültürel Çeşitlilik Hakkındaki Edebi Tartışmalarını İnceler.
M7.	2023	'Ben Bir Ülkeden Değil, Avustralya'danım.' Kostümler, Eşarplar Ve Başlarında Meyveler: Çocuklarla Farklı Kitapları Paylaşırken Kültürel Duyarlılık Gösteren Pedagojiye Acil İhtiyaç.	Helen Adam	Eric	Çocukların Kendileri, Kimlikleri Ve Kültürel, Sosyal Veya Tarihsel Olarak Farklı Olabilecek Kişiler Hakkındaki Bilgi Ve Anlayışlarını Genişletmek, Böylece Çeşitliliği Ve Kapsayıcılığı Desteklemek Açısından Önemlidir.
M8.	2022	"Çocuklar En Güzel Şeyleri Söyler": Küçük Çocukların Önyargı Karşısı Resimli Kitaplarla Etkileşimi	Katie A. Brimmer	Eric	Küçük Çocukların Önyargı Karşısı Kitaplara Verdikleri Doğal Tepkileri Gözlemler.
M9.	2023	Çeşitliliğin Amaç Olmadığı Durumlarda: Sınıfta Aynalar, Pencerele ve Sürgülü Cam Kapılar	Kaitlin M. Jackson	Eric	Çeşitliliğin Amaçlanmadığı, Aksine Çok İhtiyaç Duyulan Temsili Sergileyen Kitapları Bilinçli Olarak Seçme Fırsatı. Aynalar, Pencerele Ve Sürgülü Cam Kapılar Kavramlarından Yola Çıkar.
M10.	2018	Çocuk Resimli Kitaplarında Japon Kültürünü Anlamak: Kültürel Açından Otantik Temsil Ve Tarihi Olaylar/Siyasi Konular	Junko Yokota	Eric	Japon Kültürünün Otantik (Aslına Uygun) Temsil Edilmesi İle Oryantalist Bakış Açısı Arasındaki Farkı İşler.
M11.	2021	Resimli Çocuk Kitaplarında Göç Teması Ve Kültürlerarası Duyarlılık Bağlamında Anlatı Unsurlarının Kullanımı	Ezgi İnal	Tr Dizin	Türkiye'deki Kitaplarda Göçün Anlatı Unsurlarını Ve Çocukların Bu Konudaki Duyarlılığını Analiz Eder.
M12.	2021	Göç Ve Mülteci Konulu Resimli Çocuk Kitaplarının İncelenmesi	Melike Rüya Arıcı Sonnur Işıtan	Tr Dizin	Mültecilik Kavramının Çocuk Edebiyatındaki Temsiliyetini İçerik Analizi Yöntemiyle Tarar.
M13.	2018	Göç Ve Mültecilik Kavramlarının Resimli Çocuk Kitaplarına Yansıması	Hatice Merve Okcu Çobanoğlu	Yök Tez	Çocuklara Yönelik Hazırlanan Göç Temalı, Resimli Kitapların Görselleri Ve Metinleri Karşılaştırmalı Biçimde Ele Alır.
M14.	2018	Türkiye'de Yayınlanan Yerli, Çeviri Resimli Çocuk Kitaplarının Kültür Bağlamında Değerlendirilmesi	Hilal Taşdemir	Zeynep Yök Tez	55 Adet Resimli Çocuk Kitabı İncelenerek Kültür Bağlamında Değerlendirilmiştir.
M15.	2018	Çocuk Edebiyatında Çeşitlilik	M. Leahy & C. Foley	WebOf Science	Çocuk Kitaplarında Çeşitliliği İnceler.

M16.	2021	Özgünlük Kaybolduğunda: Tek Kültürlü Çocuk Edebiyatı, Azınlık Gruplarından Çocukların Seslerini Nasıl Susturuyor ve Görünmezliğine Nasıl Katkıda Bulunuyor?	Helen Adam	WebOf Science	Çocuğun ailesini, kültürünü, dilini ve değerlerini tanımak, değer vermek ve saygı duymak, sosyal açıdan adil eğitimin merkezinde yer alır.
------	------	---	------------	---------------	--

BULGULAR

Bu bölümde, sistematik derleme kapsamına dahil edilen araştırmalardan elde edilen veriler, makalenin temel araştırma soruları çerçevesinde gruplandırılarak sunulmuştur.

1. Resimli Çocuk Kitaplarında Göç Olgusunun Ele Alınış Biçimleri

Sistematik derleme kapsamındaki 16 araştırmanın analizi; göç olgusunun çocuk kitaplarında yalnızca fiziksel bir yer değiştirme olarak değil; duygusal, sosyal, kültürel ve pedagojik boyutlarıyla ele alındığını göstermektedir. Bu yansımalar birbirini tamamlayan beş ana boyut altında incelenmiştir (Bkz. Tablo 2):

Tablo 2. İncelenen Çalışmalara Göre Resimli Çocuk Kitaplarında Göç Olgusunun Ele Alınış Biçimleri ve Dağılımı

Göç Olgusunun Ele Alınış Biçimleri	Alt Temalar ve Kitaplardaki Göstergeler	İlgili Yayınlar	Frekans (f)
1.1. Zorunlu Göç, Mültecilik ve Hak Arayışı	• Yasal zeminler, varoluş çabası, fiziksel güçlükler • Yoksunluklar ve sosyal adalet/hak ihlali boyutu	M11, M12, M13, M16	4
1.2. Psikolojik Süreçler: Aidiyet, Özlem ve İyileşme	• Hasret, ayrılık sancısı, içsel engeller • Bibliyoterapi, uyum süreci, öz değer ve güven	M2, M5, M15	3
1.3. Kültürel Kimlik, Temsil ve Çatışma	• Oryantalist perspektif, klişeler, aslına uygunluk • Aksesuar/kostüm düzeyinde temsil, hegemonya ve direniş	M1, M4, M7, M10	4
1.4. Dilsel Bariyerler ve Çok Dillilik	• Yapısal güçlük olarak dil bariyeri • Kültürel sermaye ve zenginlik olarak çok dillilik	M3, M5	2
1.5. Sosyal Etkileşim ve Önyargı Karşıtlığı	• Kalıp yargıları yıkma, erken çocuklukta tutumlar • Aynalar ve pencereler metaforu, kültürel aktarım	M6, M8, M9, M14	4

1.1. Zorunlu Göç ve Hak Arayışı (M11, M12, M13, M16): Mülteci çocukların edebiyattaki yansımalarına, kitlesel göçün getirdiği yoksunluklara, mekân kullanımına, dışlanmaya ve sosyal adalet/hak ihlalleri bu çalışmaların temel eksenini oluşturmaktadır.

1.2. Psikolojik Süreçler (M2, M5, M15): Ayrılık, özlem ve aidiyet arayışını inceleyerek; kültürel çeşitliliğin çocukların özgüven ve uyumuna katkısı ve bibliyoterapinin destekleyici işlevi üzerinde durulmuştur.

1.3. Kültürel Kimlik ve Temsil (M1, M4, M7, M10): Özellikle Batı merkezli eserlerdeki oryantalist bakış açısını ve kalıp yargıları eleştirerek; baskın söylemlere karşı gerçekçi ve dirençli alternatif temsillerin gerekliliği ön plana çıkarılmıştır.

1.4. Dilsel Bariyerler ve Çok Dillilik (M3, M5): Dil olgusu iki farklı düzlemde ele alınmıştır; dil, yeni topluma uyum sürecinde karşılaşılan "yapısal bir engel" olarak görülürken, aynı zamanda kapsayıcılığı besleyen bir "kültürel zenginlik ve sermaye" kaynağı olarak konumlandırılmıştır.

1.5. Sosyal Etkileşim ve Önyargı Karşıtlığı (M6, M8, M9, M14): Erken çocukluk döneminde şekillenen tutumların kalıcılığına vurgu yapılarak, çocuk edebiyatının çocuklardaki önyargıları esnetme veya azaltmadaki rolü değerlendirilmiştir.

2. Çocuk Kitaplarında Kültürel Temsiller

Sistematiik derleme kapsamındaki 16 araştırmada, resimli çocuk kitaplarında yer alan kültürel temsillerin nitelikleri; otantiklik, eleştirel bakış, metaforik sunumlar ve temsil adaleti gibi kavramsal çerçeveler etrafında incelenmiştir. Elde edilen bulgular doğrultusunda, kültürel temsil biçimlerinin altı farklı alanda yoğunlaştığı saptanmıştır (Bkz. Tablo 3):

Tablo 3. İncelenen Çalışmalara Göre Çocuk Kitaplarında Kültürel Temsillerin Nitelikleri ve Dağılımı

Kültürel Temsil Biçimleri	Alt Temalar ve Kitaplardaki Göstergeler	İlgili Yayınlar	Frekans (f)
2.1. Otantiklik ve Yanlış Temsil Sorunu	• Yüzeysel benzerlikler yerine tarihsel ve siyasi derinlik • Egzotik nesneler, folklorik kıyafetler, sığlaşma ve görünmezlik	M1, M7, M10, M16	4
2.2. Metaforik Sunumlar: Aynalar, Pencereler ve Kapılar	• Özdeşim süreçleri, "aynalar, pencereler ve sürgülü kapılar" • Bilinçli kitap seçimi, önyargı karşıtı tutumlar	M8, M9	2
2.3. Eleştirel Çok Kültürlülük ve Hegemonya	• Güç mücadelesi, kültürel hegemonyaya başkaldırı • Eleştirel bilinç uyandırma, dilsel zenginlik ve kültürel sermaye	M3, M4	2
2.4. "Öteki" ve Göçmen Kimliği Olarak Temsil	• Entegrasyon süreçleri, "öteki" inşası ve dil bariyerleri • "Yeni gelen" deneyimleri ve bibliyoterapi desteğ	M2, M5	3
2.5. Türkiye Bağlamında Yerli ve Çeviri Temsiller	• İçerik analizi tekniği, kültürlerarası duyarlılık parametreleri • Metinsel ve görsel mukayese, yerli-çeviri eser farklılıkları	M11, M12, M13, M14	4
2.6. Sosyal Adalet ve Çeşitliliğin Kapsamı	• Kapsamlı kültürel çeşitlilik, toplumsal farkındalık • İrksal çeşitlilik ve yapılandırılmış edebi tartışmalar	M6, M15	2

2.1. Otantiklik ve Yanlış Temsil Sorunu (M1, M7, M10, M16): Amerikan ve Batı merkezli çocuk edebiyatında azınlık (özellikle Asya) kültürlerinin yüzeysel aktarımı eleştirilmekte; egzotik ögeler veya yalnızca folklorik kıyafetlere indirgenmiş sığ anlatılar yerine tarihsel ve siyasal derinliğin önemi saptanmıştır.

2.2. Metaforik Sunumlar: Aynalar, Pencereler ve Kapılar (M8, M9): İncelenen eserler; çocuğın kendi dünyasını bulduğu aynalar, başka kültürleri gözlemlediği pencereler ve yeni yaşantılara geçişi simgeleyen kapılar metaforları üzerinden çözümlenmiş; sınıf içi bilinçli kitap seçiminin erken yaşta önyargı karşıtı tutum geliştirmedeki rolü vurgulanmıştır.

2.3. Eleştirel Çok Kültürlülük ve Hegemonya (M3, M4): Edebi içeriklerdeki kültürel temsiller, toplumsal güç dengeleri ve baskın söylemler yönünden sorgulanmıştır. Çeşitliliğin yalnızca görsel farklılıklardan ibaret olmadığı; doğrudan eleştirel farkındalık, hegemonya ve kültürel sermaye ile ilişkili olduğu sonucuna varılmıştır.

2.4. "Öteki" ve Göçmen Kimliği Olarak Temsil (M2, M5, M15): Farklı ülkelerin (Kanada, İtalya vb.) çocuk edebiyatı örneklerinde göçmen karakterlerin çoğunlukla "öteki" kimliği üzerinden kurgulandığı belirlenmiş; uyum ve dil sorunları ele alınırken bibliyoterapinin bu çocuklardaki iyileştirici ve destekleyici rolüne işaret edilmiştir.

2.5. Türkiye Bağlamında Yerli ve Çeviri Temsiller (M11, M12, M13, M14): Türk çocuk edebiyatındaki mülteci ve göçmen karakterler kültürlerarası duyarlılık ölçütleri çerçevesinde değerlendirilmiştir. İçerik analizi ağırlıklı bu çalışmalarda, görsel-metinsel ilişkiler ile yerli ve çeviri kitaplardaki temsil dinamikleri incelenmiştir.

2.6. Sosyal Adalet ve Çeşitliliğin Kapsamı (M6, M15): Okul öncesi sınıflarında ırksal ve kültürel çeşitliliğe dair temsillerin edebi tartışmalar ve vaka incelemeleri aracılığıyla nasıl işlendiği ele alınmış; kapsayıcı içeriklerin çocukların erken yaştaki toplumsal farkındalık süreçlerine etkisi ortaya konmuştur.

3. Resimli Çocuk Kitaplarının Biçimsel Özellikleri

Sistematiik derleme kapsamındaki araştırmalar, göç ve çok kültürlülük temalı resimli çocuk kitaplarını yalnızca metinsel içerikleri boyutuyla değil; görsel, kurgusal ve materyal yapılarını kapsayan biçimsel özellikleri açısından da analiz etmektedir. İlgili çalışmaların incelenmesi sonucunda elde edilen bulgular, altı temel odak noktası etrafında şekillenmektedir (Bkz. Tablo 4):

Tablo 4. İncelenen Çalışmalara Göre Resimli Çocuk Kitaplarının Biçimsel Özellikleri ve Dağılımı

Biçimsel Özellikler	Alt Temalar ve Kitaplardaki Göstergeler	İlgili Yayınlar	Frekans (f)
3.1. Metin ve Görsel İlişkisi	- İki kanallı anlatı, görsel-yazılı söylem uyumsuzluğu - Paralel uyum veya zıt anlam katmanları, sanatsal üslup	M1, M10, M13	3
3.2. Anlatı Unsurları ve Kurgusal Yapı	- Zaman, mekân, karakter kurgusu; olay örgüsü kalıpları - Tekrarlayan kurgular, sembolik dil ve metaforik stratejiler	M5, M11, M12	3
3.3. Görsel Simgencilik ve Materyal Kullanımı	- Geleneksel kıyafet/aksesuarlar, dekor eleştirisi - Görsel araç olarak kitaplar, sınıf içi pedagojik sunum	M7, M9	2
3.4. Çağdaş Resimleme ve Estetik Yaklaşımlar	- İllüstrasyon teknikleri, duygusal atmosferin yansıtılması - Kitap boyutu, kâğıt niteliği ve baskı teknolojileri	M2, M14	2
3.5. Etkileşimli ve Karşılıklı İletişim Süreçleri	- Fiziksel tasarım, sayfa çevirme/görsel anlamlandırma - Etkileşimli anlatı modelleri, toplu okuma pratikleri	M6, M8	2
3.6. Literatürdeki Genel Eğilimler	- Dilsel çeşitlilik-görsel kurgu ilişkisi, iki dilli kitap tasarımı - Otantik ses eksikliği, toplumsal eleştiri gücünün zayıflaması	M3, M4, M15, M16	4

3.1. Metin ve Görsel İlişkisi (M1, M10, M13): Görsel anlatım ile yazılı içerik arasındaki uyumsuzlukların kültürel yanlış temsillere neden olduğu saptanmıştır. Göç anlatılarındaki bu iki kanallı yapının paralel bir uyum sunabileceği gibi zıt anlam katmanları da yaratabileceği, dolayısıyla sanatsal üslubun belirleyici bir rol oynadığı saptanmıştır.

3.2. Anlatı Unsurları ve Kurgusal Yapı (M5, M11, M12): Zaman, mekân ve karakter kurgusu gibi temel öğelerin kültürlerarası farkındalık inşa edecek biçimde yapılandırılması incelenmiştir. Savaş ve zorunlu göç gibi hassas meselelerin aktarımında sembolik dil ve metaforik stratejilerin kullanıldığı görülmüştür.

3.3. Görsel Simgencilik ve Materyal Kullanımı (M7, M9): Geleneksel kıyafet, örtü ve aksesuar gibi öğelerin dekoratif birer arka plan unsuru olarak kalmaması, aksine derinlikli ve gerçekçi biçimde yansıtılması gerektiği saptanmıştır. Bu yönüyle kitaplar, sınıf içi pedagojik uygulamalarda kültürel etkileşimi besleyen güçlü görsel materyaller olarak değerlendirilmiştir.

- 3.4. Çağdaş Resimleme ve Estetik Yaklaşımlar** (M2, M14): Çeşitli illüstrasyon tekniklerinin, göç temasına ait duygusal iklimi çocuk okurlara aktarmadaki gücü üzerinde durulmuştur. Görsel desteğin yanı sıra kitap boyutu, kâğıt türü ve baskı niteliği gibi fiziksel bileşenler de karşılaştırmalı olarak ele alınmıştır.
- 3.5. Etkileşim ve Karşılıklı İletişim Süreçleri** (M6, M8): Kitapların fiziksel tasarımı, sayfa çevirme deneyimi ve görselleri yorumlama süreçlerinin çocuklarda önyargı karşıtı tutumlara etkisi incelenmiştir. Etkileşimli anlatı modelleri ile toplu okuma pratiklerinin çocukların ırksal farkındalıklarını geliştirmedeki pedagojik etkileri vaka analizleriyle rapor edilmiştir.
- 3.6. Literatürdeki Genel Eğilimler** (M3, M4, M15, M16): Dilsel çeşitlilik ile görsel kurgu arasındaki bağlar ve iki dilli kitap tasarımları bu grupta toplanmıştır. Yapıtlarda kültürel temsillerin sığ kalmasının, eserdeki otantik ses eksikliğine yol açtığı ve toplumsal eleştiri gücünü zayıflattığı yönündeki akademik tartışmalar ön plandadır.

4. İncelenen Kitapların İçerik Özellikleri

Sistematik derleme kapsamında incelenen çalışmalarda ele alınan resimli çocuk kitaplarının içerik özellikleri; tematik çeşitlilik, kavramsal derinlik ve eğitsel amaçlar bakımından analiz edilmiştir. Makalelerden elde edilen bulgular doğrultusunda, içerik özelliklerinin altı temel kategori altında harmanlandığı belirlenmiştir (Bkz. Tablo 5):

Tablo 5. İncelenen Çalışmalara Göre Çocuk Kitaplarının İçerik Özellikleri ve Dağılımı

İçerik Özellikleri	Alt Temalar ve Kitaplardaki Göstergeler	İlgili Yayınlar	Frekans (f)
4.1. Sosyal Adalet ve Eleştirel Çok Kültürlülük	- Baskın toplumsal anlayışları sorgulama - Gerçek yaşam deneyimleri, farkındalık köprüleri kurma	M4, M7, M15, M16	4
4.2. Göçün Duygusal ve Pratik Zorlukları	- Dil bariyeri, vatan özlemi, "öteki" olarak konumlanma - Kültürel geçiş evreleri, bibliyoterapi potansiyeli	M2, M5	2
4.3. Önyargı Karşıtlığı ve Empati Gelişimi	- Önyargı karşıtı muhteva, kapsayıcı bakış açısı - İrksal okuryazarlık becerileri, kültürlerarası duyarlılık	M6, M8, M11	3
4.4. Temsiliyet ve Kimlik İnşası: Aynalar-Pencereler	- Öz-kimlik inşası, edebi içerikte temsil adaleti tesisi - Çok dilli yapılar, öz-saygı ve kültürel miras değer algısı	M3, M9	2
4.5. Otantiklik, Tarihsel ve Siyasi Gerçeklik	- Doğruluk ilkesine sadakat, kronolojik/olgusal tutarlılık - İdeolojik çarpıtmalar ve hatalı kodlanmış kültürel semboller	M1, M10	2
4.6. Türkiye Örneğinde Mültecilik ve Değerler	- İnsani krizler, sığınma hakkı, varoluş mücadelesi - Geleneksel değer yargıları ile evrensel kodların harmanlanması	M12, M13, M14	3

- 4.1. Sosyal Adalet ve Eleştirel Çok Kültürlülük** (M4, M7, M15, M16): Çocuk kitaplarının yerleşik kültürel kabulleri sorgulama ve eleştirel düşünmeyi besleme işlevi incelenmiştir. Çeşitliliğin yüzeysel unsurlarla sınırlanmaması gerektiği, azınlık grupların gerçek hayat deneyimlerine yer verilmesinin toplumsal yapıyı anlamlandırmadaki rolü tartışılmıştır.

- 4.2. **Göçün Duygusal ve Pratik Zorlukları** (M2, M5): Yerinden edilme sürecinin çocuk dünyasındaki duygusal izdüşümleri ile dil engeli, memleket hasreti ve dışlanma gibi pratik güçlükler birlikte çözümlenmiştir. Bu eserlerin kültürel uyum süreçlerinde ve bibliyoterapi uygulamalarında üstlenebileceği destekleyici roller ortaya konmuştur.
- 4.3. **Önyargı Karşılığı ve Empati Gelişimi** (M6, M8, M11): Önyargı karşıtı muhtevanın çocukların kalıp yargılarını kırmadaki etkisi üzerinde durulmuştur. Kültürel ve ırksal çeşitlilik içeren yapıtlardan, planlı tartışma etkinlikleri yoluyla çocuklarda ırksal okuryazarlık, kültürlerarası duyarlılık ve empati becerilerini geliştirmede nasıl yararlanılabileceği rapor edilmiştir.
- 4.4. **Temsiliyet ve Kimlik İnşası**: Edebi metinlerde temsil adaletinin sağlanmasının çocukların öz kimlik gelişimi üzerindeki etkileri tartışma zeminine taşınmıştır. Çok dilli kitap yapılarının çocukların özsaygı gelişimine ve kültürel miras algısına sunduğu katkı vurgulanmıştır.
- 4.5. **Otantiklik, Tarihsel ve Siyasi Gerçeklik** (M1, M10): Kültürel ve tarihsel verilerin çocuk edebiyatında olgusal ve kronolojik bir tutarlılıkla yansıtılmasının önemi üzerinde durulmuştur. Tarihsel olayların gerçekçi sunumunun çocukların algı dünyası için bir gereklilik olduğu belirtilirken; ideolojik çarpıtmalar ile hatalı sembollerin olumsuz yansımalarına dikkat çekilmiştir.
- 4.6. **Türkiye Örneğinde Mültecilik ve Değerler** (M12, M13, M14): Türkiye örneğinde mültecilik, sığınma hakkı, temel insan hakları ve yaşam mücadelesi gibi hassas konuların çocuk kitaplarındaki işleniş biçimleri taranmıştır. Yerli ve çeviri eser karşılaştırmaları üzerinden geleneksel değer yargıları ile evrensel kültürel kodların edebi metinlerdeki dengesi ve sentezi değerlendirilmiştir.

SONUÇ VE TARTIŞMA

Tartışma

Ulaşılan sonuçlar, çocuk edebiyatında göçün çoğunlukla kayıp ve travma üzerinden işlendiğini; mülteci çocukların direnç, uyum ve güçlenme yönlerinin ise yeterince vurgulanmadığını göstermektedir (Arıcı & Işıtan, 2021; Çobanoğlu, 2018; İnal, 2021). Bu sınırlı anlatı, okul öncesi dönem çocuklarının karakterlerle sağlıklı bağ kurmasını güçleştirmektedir. Göçün neden olduğu özlem ve ayrılık gibi psikolojik temaların çocuklara aktarımında yaş düzeyi ve pedagojik uygunluğun dikkate alınması önemlidir (Solis, 2019). Bu bağlamda, çok kültürlü sınıflarda bibliyoterapi uygulamalarının destekleyici bir araç olarak kullanılabileceği belirtilmektedir (Li & Adams, 2024; Leahy & Foley, 2018). Eserlerde dil olgusunun ele alınış biçimi incelendiğinde farklı yaklaşımların öne çıktığı görülmektedir. Dil, bazı araştırmalarda uyum sürecinde aşılması gereken bir engel olarak değerlendirilirken (Solis, 2019), bazı araştırmalarda ise kültürel çeşitliliği ve kimliği destekleyen bir unsur olarak ele alınmaktadır (Papadopoulou & Rodosthenous, 2022). Kitapların hem öz kimliği yansıtan bir "ayna" hem de dış dünyayı tanıtan bir "pencere" işlevi görmesi bu engellerin aşılmasında temel etkidir (Jackson, 2023). Ancak yerli kitaplarda dilsel çeşitliliğin bir zenginlik olarak sunulma oranının çeviri eserlere kıyasla daha geride kalması (Taşdemir, 2018), yerel okul öncesi edebiyatında temel bir yenilenmeye ihtiyaç duyulduğunu göstermektedir.

İncelenen araştırmalarda yalnızca farklı kültürlerden karakterlere yer verilmesinin çok kültürlü temsil için yeterli olmadığı görülmüştür. Kültürel öğelerin bağlamından koparılıp sığ sunulması kalıp yargıları artırmakta (Wangbei, 2025; Yokota, 2018); yüzeysel folklorik unsurlar ise "aksesuar düzeyinde temsil" sergilemektedir (Adam, 2023). Adam (2021), kültürel çeşitliliğin yüzeysel göstergelerle değil,

anlamalı temsillerle desteklenmesi gerektiğini belirtmektedir. Oysa çocuk edebiyatı, baskın söylemlere karşı eleştirel bir pedagojik materyaldir (Ong & Pal, 2022). Sınıf içi kitap tartışmaları çocukların kalıp yargılarını kırmada somut etkiler sağlarken (Kim, 2015); Türkiye bağlamında mülteci karakterlerin pasif ve yardıma muhtaç gösterilmesi (Arıcı & Işıtan, 2021; İnal, 2021) çözülmesi gereken temel bir problemdir.

Son olarak, okul öncesi dönemde görsellerin önceliğine rağmen kitapların biçimsel derinliği sıklıkla ihmal edilmektedir. Metin-görsel uyumsuzlukları kültürel yanlış anlamalara yol açabileceğinden yazar ve illüstratör iş birliği büyük bir gerekliliktir (Çobanoğlu, 2018; Wangbei, 2025). Görsel sıklıkla kültürel gerçekliği zedelerken (Adam, 2023), otantik ve ikidilli tasarımlar çocukların empati süreçlerini ve anlatıdaki otantik sesi desteklemektedir (Brimmer, 2022; Leahy & Foley, 2018; Ong & Pal, 2022). Bu durum, yerli çocuk yayıncılığı uygulamalarının kültürel temsil açısından daha ayrıntılı incelenmesini gerekli göstermektedir.

Sonuç

İncelenen çalışmaların önemli bir kısmında göç olgusunun kayıp ve travma temaları etrafında ele alındığı görülmüştür. Bazı yerli eserlerde dil unsurunun uyum sürecini zorlaştıran bir etken olarak ele alındığı, uluslararası literatürde ise kültürel çeşitliliğin bir boyutu olarak değerlendirildiği görülmüştür. Eserlerdeki kültürel temsillerin "aksesuar düzeyinde" ve yüzeysel kaldığı, öğelerin bağlam dışı sunulmasının önyargı riski taşıdığı, ancak nitelikli kitap tartışmalarının çocuklarda eleştirel düşünmeyi tetiklediği görülmüştür. Türkiye örneğinde mülteci karakterlerin pasif ya da kırılgan resmedildiği, yerli eserlerde geleneksel, çeviri eserlerde ise evrensel kodların ağırlıkta olduğu saptanmıştır. Son olarak, okul öncesi dönem için kritik olan görsel tasarımın bağımsız anlam dünyasının ihmal edildiği, metin-görsel uyumsuzluklarının yanlış anlamalara zemin hazırladığı ve iki dilli kitaplarda otantik sese odaklanan bütüncül araştırmaların oldukça sınırlı olduğu görülmüştür.

Öneriler

Göçmen karakterler direnç ve güçlenme boyutlarını içeren çok boyutlu yapılarla kurgulanmalı; görsel tasarımlarda klişelerden kaçınılarak otantik ve ikidilli eserler geliştirilmelidir. Okul öncesi öğretmenleri, sınıflarında ırksal okuryazarlık, empati ve kültürlerarası duyarlılığı geliştirmek adına eleştirel kitap tartışmalarına ve bibliyoterapi uygulamalarına yer vermelidir. Metin içeriği kadar görsel tasarımın ve illüstrasyonların çocuk algısı üzerindeki etkisini inceleyen deneysel ve bütüncül çalışmalar artırılmalıdır. Gelecek araştırmalarda yerli yayınevlerinin uluslararası standartlara uyumu incelenmelidir.

KAYNAKÇA

- *Adam, H. (2021). *When authenticity is lost: Exploring the representation of cultural diversity through book sharing in early childhood settings*. *Education Sciences*, 11(1), 32. doi:10.3390/educsci11010032
- *Adam, H. (2023). 'I'm not from a country, I'm from Australia.' *Costumes, scarves, and fruit on their heads: The urgent need for culturally responsive pedagogy when sharing diverse books with children*. *Early Childhood Education Journal*, 51(8), 1469–1480. doi:10.1007/s10643-023-01467-z.
- *Arıcı, M., & Işıtan, S. (2021). Çocuk edebiyatında mültecilik ve zorunlu göç: Resimli çocuk kitapları üzerine bir inceleme. *Eğitim ve Bilim*, 46(208), 341–365. doi:10.15390/EB.2021.9165
- Banks, J. A. (2015). *Cultural diversity and education* (6th ed.). New York, NY: Routledge.
- Bishop, R. S. (1990). Mirrors, windows, and sliding glass doors. *Perspectives*, 6(3), 9–11.
- Botelho, M. J., & Rudman, M. K. (2009). *Critical multicultural analysis of children's literature: Mirrors, windows, and doors*. New York, NY: Routledge.

- *Brimmer, K. (2022). Anti-bias education in the early years: Spontaneous responses to multicultural picture books. *Early Child Development and Care*, 192(5), 789–805. doi:10.1080/03004430.2020.1804938
- *Okcu Çobanoğlu, H. M. (2018). *Göç ve mültecilik kavramlarının resimli çocuk kitaplarına yansımaları* (Yüksek lisans tezi). İstanbul Bilgi Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
- *Derman-Sparks, L. (2013). *Multicultural teaching in the early childhood classroom*. New York, NY: Teachers College Press.
- Fink, A. (2019). *Conducting research literature reviews: From the Internet to paper* (5th ed.). Thousand Oaks, CA: Sage.
- Gough, D., Oliver, S., & Thomas, J. (2017). *An introduction to systematic reviews* (2nd ed.). Thousand Oaks, CA: Sage.
- *İnal, E. (2021). Resimli çocuk kitaplarında göç teması ve kültürlerarası duyarlılık bağlamında anlatı unsurlarının kullanımı. *RumeliDE Dil ve Edebiyat Araştırmaları Dergisi*, Ö9, 166–173. doi:10.29000/rumelide.984740
- *Jackson, K. M. (2023). *When diversity isn't the point: Mirrors, windows, and sliding glass doors in the classroom*. *The Reading Teacher*, 76(4), 456–470.
- Karagöz, S. (2020). Okul öncesi çocuk kitaplarında kültürel çeşitlilik ve temsil. *Çocuk ve Medya Dergisi*, 2(1), 45–60.
- Killen, M., & Smetana, J. G. (2015). *Handbook of moral development* (2nd ed.). New York, NY: Psychology Press.
- *Kim, S. J. (2015). Racial literacy in early childhood education: Using multicultural picture books in a preschool classroom. *Journal of Early Childhood Teacher Education*, 36(4), 310–325. doi:10.1080/10901027.2015.1105326
- *Leahy, M. A., & Foley, B. C. (2018). Diversity in children's literature. *World Journal of Educational Research*, 5(2), 172–194. doi:10.22158/wjer.v5n2p172.
- *Li, S. C., & Adams, B. (2024). Supporting newcomer children's cultural transitions with contemporary Canadian picture books. *TESOL Journal*, 15(3), e802. doi:10.1002/tesj.802
- Liberati, A., Altman, D. G., Tetzlaff, J., Mulrow, C., Gøtzsche, P. C., Ioannidis, J. P., ... Moher, D. (2009). The PRISMA statement for reporting systematic reviews and meta-analyses of studies that evaluate health care interventions: Explanation and elaboration. *PLoS Medicine*, 6(7), e1000100. doi:10.1371/journal.pmed.1000100
- Millî Eğitim Bakanlığı. (2023). *Millî eğitim istatistikleri: Örgün eğitim 2022/2023*. Ankara, Türkiye: Strateji Geliştirme Başkanlığı.
- Nikolajeva, M. (2014). *Reading for learning: Cognitive approaches to children's literature*. Amsterdam, Netherlands: John Benjamins.
- Nodelman, P. (2008). *The hidden adult: Defining children's literature*. Baltimore, MD: Johns Hopkins University Press.
- *Ong, C., & Pal, A. (2022). Critical multiculturalism and resistance to cultural hegemony in children's narratives. *Race Ethnicity and Education*, 25(2), 198–215.
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., ... Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372, n71. doi:10.1136/bmj.n71
- *Papadopoulou, M., & Rodosthenous, A. (2022). Linguistic diversity as wealth: Translanguaging in multicultural picture books. *Language and Education*, 36(5), 442–459. doi:10.1080/09500782.2021.1983584

- Parekh, B. (2006). *Rethinking multiculturalism: Cultural diversity and political theory* (2nd ed.). New York, NY: Palgrave Macmillan.
- Petticrew, M., & Roberts, H. (2006). *Systematic reviews in the social sciences: A practical guid*. Oxford, England: Blackwell Publishing.
- Piaget, J. (1964). *The early growth of logic in the child*. London, England: Routledge & Kegan Paul.
- Short, K. G. (2016). *Critical content analysis of children's and young adult literature*. New York, NY: Routledge.
- *Solis, T. (2019). Quellilà: Göç sorunları ve çağdaş İtalyan çocuk albümleri. *Strenæ*, 14. doi:10.4000/strenæ.2486
- Şimşek, T., & Yakar, A. (2018). Çocuk kitaplarında kültürel temsil ve önyargılar. *Kastamonu Eğitim Dergisi*, 26(4), 1125–1138. doi:10.24106/kefdergi.427845
- *Taşdemir, H. Z. (2018). *Türkiye’de yayınlanan yerli ve çeviri resimli çocuk kitaplarının kültür bağlamında değerlendirilmesi* (Yüksek lisans tezi). Marmara Üniversitesi Eğitim Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- Vertovec, S. (2019). *Transnationalism*. New York, NY: Routledge.
- *Wangbei, L. (2025). Orientalism and ideological distortions in American picture books about China. *Comparative Education Review*, 69(1), 102–125.
- *Yokota, J. (2018). Authenticity in historical migration narratives: A focus on Japanese-American experiences. *Bookbird: A Journal of International Children's Literature*, 56(2), 24–35. doi:10.1353/bkb.2018.0022
- * İle işaretli çalışmalar, bu makale kapsamında incelenen araştırmalardır.

Türk Tangosunun Doğuşu ve Günümüz Temsilcileri

Ebrar CEVHERİ

cevheriebrar@gmail.com Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Müzikoloji
Anabilim Dalı, Niğde/Türkiye

Özet

Bu çalışma kökleri Arjantin'in Buenos Aires'e uzanan Tango sanatının Türkiye'ye gelişini ve modern dünyadaki yansımalarını ele almayı amaçlamaktadır. Batılılaşma hareketleri ile Türk müzik kültürüne dahil olan tango kısa sürede yerli bir kimlik kazanarak Türk müziği motifleri ile harmanlanmıştır. Bildiri kapsamında Tangonun etimolojik kökeni ve ortaya çıkışı ele alınmış ardından tangonun Türkiye'ye gelişi ile taş plaklardaki ilk tango bestelerine ve Necip Celal Andel, Fehmi Ege ve Necdet Koyutürk gibi öncü bestecilerin katkılarına kronolojik bir sıralamayla değinilmiştir. Çalışmanın son bölümünde ise Türk tango müziğinin günümüz temsilcilerine, bestelerine ve günümüz piyasası içerisindeki tango gruplarına değinilerek bu türün Türkiye'deki kültürel durumuna dair bir sonuç ortaya konulmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Modernleşme, Tango, Türk Müziği, Türk Tangosu

Abstract

This study aims to explore the arrival of the art of Tango—whose roots extend to Buenos Aires, Argentina—in Turkey and its reflections in the modern world. Having entered the Turkish musical landscape through Westernization movements, tango quickly gained a local identity by blending with traditional Turkish musical motifs. Within the scope of this paper, the etymological origins and emergence of Tango are examined, followed by its arrival in Turkey. The first tango compositions on 78 rpm records and the contributions of pioneering composers such as Necip Celal Andel, Fehmi Ege, and Necdet Koyutürk are presented in chronological order. In the final section, by highlighting contemporary representatives of Turkish tango music, their compositions, and active tango ensembles in today's market, a conclusion is drawn regarding the cultural status of this genre in Turkey.

Keywords: Modernization, Tango, Turkish Music, Turkish Tango

GİRİŞ

Tango Müziğinin Doğuşu

Tango, sen bir çığlık, bir hıçkırıksın... Sarhoş olduklarında bile gülmesini bilmeyen insanların şarkısıdır..."

Fernan Silva Valdes

Tango kelimesinin etimolojik kökenine bakıldığında muhtelif görüşler görmekteyiz. 19. yüzyılda özgür bırakılmış siyahilerin Rio De la Plata'da bir araya geldikleri yer olan Tambo'dan gelmektedir. Başka bir görüş ise 1803 ten bu yana İspanyolcada var olduğunu ve tango kelimesinin Aşık Kemiği olarak tanımlamaktadır (Sariboğa, 2019: 264). Uruguaylı toplum bilimci Daniel Vildart tango sözcüğünün Afrika dilindeki tambo (tambur, davul) ya da tangir veya tocar'dan (dokunmak, bir enstrüman çalmak) türediğini söylemektedir. Enrique Corominas ise 1836 yılında Arjantin anlamında kullanıldığını söyleyerek ilk öce Kanarya Adalarının bir dansı olarak ortaya çıktığını daha sonraları Amerika'da görüldüğünü ifade etmektedir. Amerika'daki siyahilerin davul eşliğinde dans ettikleri toplantılara tango ismi verilmektedir (Kurtçu, 2021: 144). Tangonun tarihi 1800'ü yıllarda Avrupalı göçmenlerin Uruguay'ın Montevideo ve Arjantin'in Buenos Aires liman kentlerinden Güney Amerika'daki Rio de la Plata'ya gelmesiyle başlar. Bekar ve genç olan İspanyol, İtalyan delikanlılardan en büyük hayalleri yeni yaşamlarında çok zengin olmak istemeleriydi (Yener, 2020: 366).

Tango müziği ve dansı on dokuzuncu yüzyılın sonlarında Buenos Aires'in güneyinde; göç ve tehlikeli yaşam koşullarının etkisi altında ortaya çıkmıştır. Bu açıdan bakıldığında tango için Arjantinli, Afrikalı ve Avrupalı halkların kültür ve müziklerinden meydana gelen melez bir form ve gündelik yaşam pratiklerinin yansıması olduğu saptanabilir. Yapılan incelemeler sonucunda tangonun Avrupa'ya ne zaman geldiği konusunda bir netlik söz konusu değildir. Ancak tango kayıtları yapmak için Paris ve Londra'ya gelen müzisyenlerin yaptıkları kayıtlar üzerinden bazı tarihlere erişmek mümkündür (Erel Çalan ve diğerleri, 2021: 193). Tangonun yayılması ve gelişmesi ses kayıt teknolojisinin gelişimiyle paralel olduğu söylenebilir. Nitekim 1877 de fonografin icat edilmesi ve 1888 itibarıyla sesin büyütülebildiği bilgisindeyiz. 1907 öncesinde çok az sayıda tango kaydı bulunmaktadır. 1907'lerde Alfredo Gobbi ve Angel Villoldo kayıt yapmak üzere Paris'e gitmişler ve bu kayıtlar yayımlandıktan sonra birçok ülkede kopyaları basılabilmektedir (Sariboğa, 2019: 264). Tango müziği 1880-1910 eski dönem ve 1910-günümüz yeni dönem olarak iki döneme ayrılmaktadır. Tango müziği ilk zamanlarda keman, flüt ve harp ile icra edilmiş; daha sonraki zamanlarda harp yerini gitar almıştır. Bu dönem

orkestralarında flüt, keman, gitar ve klarnet gibi taşınabilir çalgılar kullanılmıştır. Müzik yazılı bir şekilde değil kulaktan dolma basit ve doğaçlama melodiler ile icra edilirdi. Bu dönemdeki müzisyenler akademik çapta eğitimler almamış kendi kendine yettikleri için teknik anlamda çok gelişmiş oldukları söylenemez. Bu dönem eserlerinde çoğunlukla mutluluk teması görülmekte ve kimi şarkı sözleri müstehcendir. 1910 ile günümüzü kapsayan dönemde ise parçalar daha çok melankolikleşmeye başlamış, Piyano, kontrbas ve bandoneon orkestralara dahil olmuş; Roberto Firpo ise piyanoyu 1910'larda tango orkestralarına taşıyan kişi olmuştur (Yarkın, 2017: 3-4).

1800'lerin ikinci yarısında Arjantin mahalle kahvelerinde yapılan şenliklerde kadınlar parayla karşı cinsler ile altı dakikalık dans etmişlerdir. Genelevlerde icra edilen tango sapkınlık ve fahişelik ile bağdaştırılsa da alt kültürden çıkıp geniş kitleler tarafından ilgi görmüştür. Bu da tangonun toplumsal cinsiyet rollerinin değişmesine ve bireyler arası sosyalleşmenin pekişmesinde etkili olduğunu göstermektedir (Büyükmeşe Baran, 2024: 246). Tango ortaya çıktığı ilk zamanlarda “basit tango” veya başka bir tabirle “tango criollo” olarak ifade edilmekteydi. Ancak zamanla gelişmekte olan müzik ve dans kültürü ile bugün çok daha farklı tango adlandırmaları görülmektedir. Örneğin tangonun doğduğu ortaya çıktığı yer olarak anılan Arjantin Tangosu yanı sıra Fin Tangosu, Amerikan Tangosu, Çin Tangosu veya Türk Tangosu uluslararası tango stilleri gelişmiş ve bu isimlendirilmeler günümüzce kullanıldığı görülmektedir (Yener, 2020: 367). Tango hislerin bedensel hareketler ve müzik ile ifade etme biçimidir. Bir dans türü olan Tango içerisinde müzik, edebiyat gibi birçok kültürel öğeyi de barındırıyor. Astor Piazzola ile müzikal bir tür olarak da benimsendi. İlk dönemlerde tango doğaçlama yapılırken bilhassa Paris'e taşınmasıyla belli başlı kurallar, teknik ölçütlerle uluslararası tangonun oluştu. Böylece her ülke kendi kültür ve müziğinden izler taşıyan tangolar ortaya çıkardı. Arjantin tangosu yanı sıra İspanyol Tangosu, Fransız tangosu, Alman Tangosu, İtalyan tangosu, Rus tangosu, Amerikan tangosu, Azeri Tangosu, Türk tangosu, Japon Tangosu gibi farklı stiller ortaya çıkmıştır (Ertaş, 2022: 23).

Türk Tango Müziği

Tango 20. Yüzyılın başlarında Türkiye'de etkisini göstermeye başlamıştır. Özellikle batılılaşma ve modernleşmenin önemli bir unsuru haline gelmiş, zamanla popüler kültürün bir parçası olmuştur. 1928-1950 yılları arasında altın çağını yaşayarak Türk müzik tarihinde Tango türü olarak anılmaya başlamıştır. Türk tango müziği ilk olarak Arjantin ve Avrupa müziklerine sözler yazılarak ardından makamsal motifler ile Türkiye'de yer edinmiştir (Sariboğa Akça, 2021: 782). Tango ortaya çıktığı ilk yıllarda kök saldı Arjantin'de bile muhalefet bulunurken Vatikan, Almanya, İngiltere ve Rusya'dan sonra Türkiye'de de belli bir kesim tarafından muhalefet görüldü. Aslında muhalefet olarak görülen

durum; Cumhuriyet ile değişim gösteren sosyal yaşam ve kültürel devrimdi. Öyle ki kabul görülmeyen ve ayıplanan durumların başına tango kelimesi de ekleniyordu. Müstehcen ve erotik ögeli çağrışımlar Türk toplumunda hemen tango kelimesini çağrıştırıyordu (Ertaş, 2022: 196-197). Türkiye’de müzik politikaları ile oluşturulan çok sesli müzik ile tango müziği sevilmiş ve yaygınlık göstermiştir. Necip Celal Andel, Fehmi Ege ve Necdet Koyutürk gibi besteciler pek çok tango besteleyerek tangonun Türkiye’de yayılmasına öncülük etmişlerdir. Tango dansının Türkiye’deki versiyonları Ballroom Tango dediğimiz vücut temasına daha az odaklı türü olmuştur. Çeşitli ülkelerde oluşturulan tango dans grupları tango müziğinin ve dansının dünya çapında yayılmasını ve sevilmesini sağlamıştır (Yener, 2020: 369). Tango Türkiye’de dans müziği olmaktan ziyade öncelikle bir şarkı türü olarak benimsenmiştir. Türkiye’de 1930’lu yıllarda yükselmiş 50’li yıllara kadar altın çağını yaşamıştır. 60’lı yıllara gelindiğinde batı müziği türlerinde eserler verilmeye başlayınca ilgi azalmıştır. Ülkemizde tango müzik türü Türkçe sözlü tangolar ve Arjantin tangoları olarak iki farklı şekilde belirmiştir. Bu süre zarfında tango orkestraları kurulmuş, festival ve konser programları düzenlenmiş, plak, kaset ve cd kayıtları oluşturulmuştur (Kurtçu, 2021: 145-146). Tango ülkemizde Arjantin ve Fransız tango plakları ve giderek artan gramofon cihazları ile tanınıp sevilmeye başladı. Ülkemizde gramofon sayısının artmış, İstanbul ve Ankara’da radyo istasyonlarının kurulmasıyla birlikte radyo satışları da başlamıştı. Radyolarda Klasik Türk Müziğine ilaveten batı müziği ve dans müzikleri de çalmaya başlanmıştı. Ev işleri ile meşgul kadınların yegâne uğraşı radyo olmuş, dışarda lokantalarda yemek yiyen insanlar artık radyo eşliğinde yemeklerini yiyebiliyordu. Tango gramofon eşliğinde pikniğe giden ailelerin, kızlı erkekli genç gruplarının çay partilerine kadar dahil olmuş hayatın bir parçası haline gelmişti (Ertaş, 2022: 200). Ülkemizde bestelenen ilk Türk tangosu Muhlis Sebahattin Ezgi’nin bestelediği olduğu Tango Türk adlı enstrümantal eseridir. Sözlü bir şekilde bestelenen ilk Türk tango ise Necip Celal Andel’in 1928 yılında bestelediği olduğu *Mazi* isimli tangosudur (Kurtçu, 2021: 146). Necip Celal Andel 1928 yılında henüz 18 yaşında iken “Mazi” isimli tangosunu besteler. Yıllar sonra batı müziği parçalarına karşı artan ilgi ile “Sahibinin Sesi” firması bu tango bestesini plak yapmak ister. Plaklara batılı parçalar okuyan sanatçılar arasında Seyyan Hanım’ın tango okumaya en uygun ses olduğu kanaatine varılmıştır. Plak yayınlandığı dönemde epey bir ilgi görmüştür. Mazi tangosunun ardından yine Necip Celal Andel’in Ayrılık isimli tangosu yer alır. Seyyan Hanım plaklarda bir Türk bestecisinin bir tango bestesini seslendirerek Cumhuriyet aydınlanmasının bir sembolü olmuştur. Modern Cumhuriyette kadın ve erkeklerin bir arada eşit olduğunu yeni kabullenmekte olan toplumun kadın sanat öncülerinden biri olmuştur (Ertaş, 2022: 203).

Mazi

Ben de gönül çektim eskiden/Yandı hayatım bu sevgiden

Anladım ki bir aşka bedel/Gençliğimmiş elimden giden

Önünde ben geldim de size/Yar olmadı bu kimsesize

En nihayet düşüp can verdi/Gözündeki yeşil denize

Bağlandım sana belden/Geçmedim bu emelden

Bir hazin maceradır/Onu aldılar elden

Başkasına yar oldu/Eller bahtiyar oldu

Gölüm hep baştan başa/Viran bir diyar oldu

Mazi kalbimde bir yaradır/Bahtım saçlarından karadır

Beni zaman zaman ağlatan/İşte bir hazin maceradır

Ne göğsünde uyuttu beni/Ne buseye avuttu beni

Geçti ardından uzun yıllar/O kadın da unuttu beni

Ülkemizde tango müziğinin önde gelen bestecilerine baktığımızda Necip Celal Andel, Necdet Koyütürk, Fehmi Ege, Ziyaettin Sarıkartal, Nusret Rıfkı, Halit Bedii Akçay, Mustafa Şükrü ve Kadri Cerrahoğlu’nu görmekteyiz. Tango yorumcuları olarak; Seyyan Hanım, İbrahim Özgür, Secaettin Tanyerli, Selçuk Kaskan ve Celal İnce karşımıza çıkmaktadır (Kurtçu, 2021: 146).

Viyolonsel virtüözü, besteci ve orkestra şefi Fehmi Ege tango ve tango dışı besteleriyle, İstanbul ve Ankara’da kurmuş olduğu tango orkestraları ve yapmış olduğu bant kayıtları ile Türkiye’de batı müziğinin benimsenmesinde önemli rol üstlenmiştir. Yaklaşık 300 tango bestelemiştir. “*Mehtaplı Bir Gecede, Ayrılık ve Sana Nerden Gönül Verdim*” tangoları Türkiye tango tarihine derin izler bırakan besteleri olmuştur. İlk tango solistlerine bakıldığında (1930) Afife Hanım dikkat çekmektedir. *Şivekar, Gül Tango ve Sevda* tangolarını 1930 yılında plağa okumuştur. Bu üç tangoyu önemli kılan unsur Avrupalı müzisyenler tarafından bestelenmiş olup üzerine Türkçe sözler yazılmasıdır (Narter, 2016: 203). Plaklarda parlayan bir başka ses Fikriye Şakrarkses olmuştur. Sahibinin Sesi plaklarında “*Kadın Güler*” adlı tango ile yer almıştır. Merhum tiyatro sanatçısı Gülrüz Sururi’nin annesi Suzan Lütfullah ise “*Ben Bir Çingeneyim ve Bulvardaki Küçük Bar*” tangolarını plaklara okuduğunu görmekteyiz. Seyyan Hanım’ın ve Mazi tangosunun bu denli ilgi görmesiyle cümbüş icrasının da yer aldığı bir saz

ekibiyle Mahmure Suat Şenses Hanım da plak yapar. Seyyan Hanım ve Mahmure Hanım'ın ardından Birsan Alan'ı görmekteyiz. Birsan Alan Sahibinin Sesi plaklarında Gül, Sensiz Hayat ve Ege Sevgi Yurdudur tangolarını seslendirmiştir. Önceleri Necip Celal tangoları seslendirirken sonraları yabancı tangolardan düzenlenmiş tangoları da seslendirmiştir (Ertaş, 2022: 204). Orkestra şefi ve keman sanatçısı; “*Mavi Gözler*” tangosunun bestecisi Müfit Hasan 1927 yılında Galatasaray lisesinin izci öğrencileri kurmuş olduğu İz Caz orkestrası karşımıza çıkmaktadır. İki keman, üç viyolonsel, akordeon, gitar, piyano ve davuldan oluşan orkestra 6 yıl faaliyet göstermiştir ve tango kayıtları da yapmıştır (Narter, 2016: 203). Henüz 16 yaşında iken İstanbul Belediye Konservatuarına giren Seyyide Poroy Emin Cenkmen'in bestelemiş olduğu; Bir rüya gibi, Seni severken can versem, Dertli Geceler, Kalbim Senindir, Mavi Gözler, Seni Hiç Görmeseydim isimli tangoları seslendirdiği kayıtlara geçmiştir (Ertaş, 2022: 205). Tangonun asıl sazı Bandoniondur. Öğrenilmesi ve hocasının da bulunması zordur. Akordiyonu andıran bir yapıda olsa da çalınması oldukça zor bir enstrümandır. Ülkemizin ilk ve en önemli Bandonion müzisyeni Orhan Avşar olarak karşımıza çıkmaktadır. Ailesinin işi sebebiyle küçük yaşta Arjantin' giderler ve burada Boenus Aires'e yerleşirler (Narter, 2016: 205). Orhan Avşar Türkiye' de Arjantin Tangosunu temsil eden bir isimdir. Orhan Avşar'ın kurmuş olduğu “*Tipik Orkestra*” Türkiye'nin ilk Arjantin tango orkestrası olarak tarihi kayıtlara geçmiştir. Orkestra Orhan Avşar'ın vefatına kadar faaliyet göstermiştir. Selçuk Kaskan ise Arjantin tangolarının solisti olarak karşımıza çıkmaktadır (Sarıboğa, 2019: 272).

YÖNTEM

Bu Araştırmada literatür taraması ve genel tarama modeli kullanılmıştır. “Genel tarama modelleri, çok sayıda elemandan oluşan bir evrende, evren hakkında genel bir yargıya varmak amacı ile evrenin tümü ya da ondan alınacak bir grup, örnek ya da örneklem üzerinde yapılan tarama düzenlemeleridir” (Karasar, 2018: 111).

SONUÇ VE TARTIŞMA

Dansın, müziğin ve edebiyatın bir arada buluştu bir tür olan Tango her millette kendine has bir yer edinmiştir. Her milletin kendi kültür ve sanatıyla harmanlanmış ve yayılmıştır. Radyo, gramofon gibi ses kayıt teknolojisinin gelişmesiyle Arjantin limanlarından tüm dünyaya yayılmıştır. Türkiye'de tango Cumhuriyet dönemi batılılaşma ve modernleşme etkisiyle kendini göstermektedir. İlk tango bestecimiz Necip Celal Andel'in Mazi isimli tangosu döneme damgasını vurduğu görülmektedir. Mazi tangosunun dönemin taş plaklarında Seyyan Hanım'ın sesi ile büyük yankı uyandırması tango müziğinin bestelenmesine ve seslendirilmesine ilgi çevirmiştir.

Necip Celal Andel, Fehmi Ege, Muhlis Sabahattin Ezgi, Ziyaettin Sarıkartal, Nusret Rıfkı, Halit Bedii Akçay, Mustafa Şükrü ve Kadri Cerrahoğlu ilk tango bestecileri olarak tespit edilmiştir. Seyyan Hanım, Afife Hanım, Fikriye Şakrakes, Bedia Akça, Birsan Alan, Seyyide Poray, Nazmiye Sedat Hanım, Saime Kentmen, Fazilet Hanım, Gönül Hanım ve Saadet Nazıkcın dönemin taş plaklarında öne çıkan kadın icracılar olduğu görülmektedir. Minür Nurettin Selçuk ise ilk erkek tango solisti olarak tespit edilmiştir.

Bugün Türkiye’de tango müziğinin temsilcilerine baktığımızda Erdener Koyutürk, Tango Neo Topluluğu, Şevval Sam ve Dilek Türkan, Sema Moritz, Ali Osman Erbaş ve Orkestrası, Piya Tango, İnci Dolu Orkestrası karşımıza çıkmaktadır.

KAYNAKÇA

Baran, A. B. (2024). Sözsüz İletişimin Modern Örneklerinden Tango Dansı: “Kadın Kokusu” Tango Dans Sahnesinin Göstergebilimsel Analizi. *Maltepe Üniversitesi İletişim Fakültesi Dergisi*, 11(2), 240-261.

Çalan, Z. G. E., Türker, Ö. A., & Karamollaoğlu, U. (2021). II. Meşrutiyetten Cumhuriyete İstanbul Gündelik Hayatında Tango. *Ankara Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 12(2), 192-204.

Ertaş, E. (2022) Türk Tangosundan Portreler: Mazi Kalbimde Bir Yara, Ankara: Platanus Publishing

Karasar, N. (2018). Bilimsel Araştırma Yöntemi: Kavramlar İlkeler Teknikler. Ankara: Nobel Akademik Yayıncılık

Kurtçu, E. (2021) Necip Celal Andel ve Tangoları Üzerine Bir İnceleme *Diyalektolog-Uluslararası Sosyal Bilimler Dergisi*, (27).

Narter, Y. (2016). Tango Böyle Bir Şey!. İstanbul: Ayrıntı Yayınları.

Sarıboğa Akça. B. (2021). Türk Tango Müziğinde Çok Yönlü Bir Besteci: Emin Cenkmn. *İdil Sanat ve Dil Dergisi*, 10(81), 781-796.

Sarıboğa, B. (2019). Tango Müziğinin Tarihsel Süreci ve Türkiye’de Tango Müziğine Genel Bir Bakış. *Ordu Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Sosyal Bilimler Araştırmaları Dergisi*, 9(2), 263-273.

Yarkın, M. B. (2017). Tango Müziğinde Piyano İcrasının Carlos Di Sarli, Anibal Troilo Ve Horacio Salgan Stilleri Üzerinden İncelenmesi. (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul.

Yener. S. (2020) Türk Tango Müziklerinin Makam ve Usul Yönünden İncelenmesi. *İdil.65* doi: 10.7816

Türkiye'nin Fındık İhracatının Dış Ticaretteki Rekabet Gücünün Değerlendirilmesi

Muhammet KARANFİL¹, Eda ÇAĞLAR²

¹E-mail: mkaranfil@comu.edu.tr Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Biga Uygulamalı Bilimler Fakültesi, Uluslararası Ticaret Ve Lojistik Bölümü, Çanakkale /Türkiye.

²E-mail: edacaglarr@hotmail.com.; Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Fakültesi, Uluslararası Ticaret Ve Lojistik Bölümü, Çanakkale / Türkiye.

Özet

Bu çalışmanın amacı, Türkiye'nin fındık ihracatı açısından dış ticaretteki rekabet gücünün değerlendirilmesidir. Bu doğrultuda, dünya fındık ihracatında önde gelen ülkelerin ihracat verileri esas alınarak rekabet gücü göstergesi olarak B. Balassa tarafından geliştirilen Açıklanmış Karşılaştırmalı Üstünlükler (RCA) indeks değerleri elde edilmiş ve 2015–2024 dönem verileri incelenmiştir. Analiz kapsamında Türkiye, Şili, İtalya, Amerika Birleşik Devletleri, Azerbaycan, Gürcistan, Hollanda, Almanya, Çek Cumhuriyeti ve Birleşik Arap Emirlikleri ele alınmıştır. Ulaşılan sonuçlara göre fındık ihracatında en yüksek rekabet gücüne sahip ülkeler Gürcistan ve Türkiye olup bu ülkelerin ortalama RCA değerleri sırasıyla 75,67 ve 63,69 olarak hesaplanmıştır. Bu ülkeleri Azerbaycan ve Şili takip etmektedir. Buna karşılık, İtalya, Amerika Birleşik Devletleri, Hollanda, Almanya, Çek Cumhuriyeti ve Birleşik Arap Emirlikleri'nin RCA değerlerinin 1'in altında kalması, bu ülkelerin fındık ihracatında rekabet gücünün zayıf olduğunu göstermektedir. Türkiye açısından değerlendirildiğinde, analiz edilen dönemde RCA değerlerinin tüm yıllarda oldukça yüksek seviyelerde gerçekleştiği ve diğer ülkelere kıyasla belirgin bir üstünlük sağladığı görülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Fındık İhracatı, Dış Ticaret Rekabet Gücü, RCA.

Abstract

The aim of this study is to evaluate Turkey's competitiveness in foreign trade in terms of hazelnut exports. To this end, Revealed Comparative Advantage (RCA) index values developed by B. Balassa were obtained as an indicator of competitiveness, based on export data from leading hazelnut exporting countries worldwide, and data from the 2015–2024 period were examined. The analysis included Turkey, Chile, Italy, United States, Azerbaijan, Georgia, Netherlands, Germany, Czech Republic, and United Arab Emirates. According to the results, Georgia and Turkey have the highest competitiveness in hazelnut exports, with average RCA values of 75.67 and 63.69, respectively. Azerbaijan and Chile follow these countries. Italy, United States, Netherlands, Germany, Czech Republic, and United Arab Emirates have weak RCA values, indicating weak competitiveness in hazelnut exports. For Turkey, RCA values were consistently high throughout all years, demonstrating a significant advantage compared to other countries.

Keywords: Hazelnut Exports, Foreign Trade Competitiveness, RCA.

GİRİŞ

B.Balassa tarafından geliştirilmiş olan RCA indeksi, dış ticarete rekabet üstünlüğünü belirlemek açısından yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu indeks ihracat değerlerinden hareketle bir ülkenin belirli bir mal ya da sektördeki ihracatının, o ülkenin toplam ihracatı içindeki payının aynı sektörün dünya toplam ihracatı içindeki payına oranlanmasıyla hesaplanmaktadır. İndeksin hesaplanması aşağıda gösterildiği gibi oluşturulmaktadır.

$RCA_{ik} = (X_{ik} / X_i) / (X_k / X)$ ve Burada i= ülke, k: ürün ve

X_{ik} : i ülkesinin k ürünü ihracatı

X_i : i ülkesinin toplam ihracatı

X_k : k ürünü için dünya toplam ihracatı

X : dünya toplam ihracatı vermektedir.

Kısaca bu oran bir ülkenin belirli bir ürün grubundaki dış ticaret performansını değerlendirerek rekabet avantajı ile uzmanlaşma seviyesini ortaya çıkarmaktadır (Karanfil ve Topçu, 2024: 3125)

Çalışmada kullanılan veriler Trade Map veri tabanından derlenmiştir. İlgili verilere yönelik ilk olarak dünya fındık ihracatında ilk sırada yer alan ülkelerin ihracat değerleri ve sıralamaları paylaşılmıştır. Devamında ilgili ülkelere yönelik RCA değerleri hesaplanarak ülkelerin rekabet seviyeleri belirlenmiş ve Türkiye'nin bu ülkelere göre fındık ihracatı açısından dış ticaretteki rekabet düzeyi ortaya çıkarılmıştır.

2. Dünya ve Türkiye Fındık İhracatının RCA Kapsamında Değerlendirilmesi

Dünya fındık üretimi ve ihracatını ülke bazında ele aldığımızda üretimin büyük bir kısmının Türkiye'ye ait olduğu görülmektedir. İhracat açısından baktığımızda dünya fındık ihracatında Türkiye'nin ilk sırada yer almaktadır. İlgili dönem içerisinde dünya fındık ihracatında genel olarak artış yaşanmıştır.

Tablo 1: Dünya Fındık İhracatında İlk Sırada Yer Alan Ülkeler (Milyar Dolar)

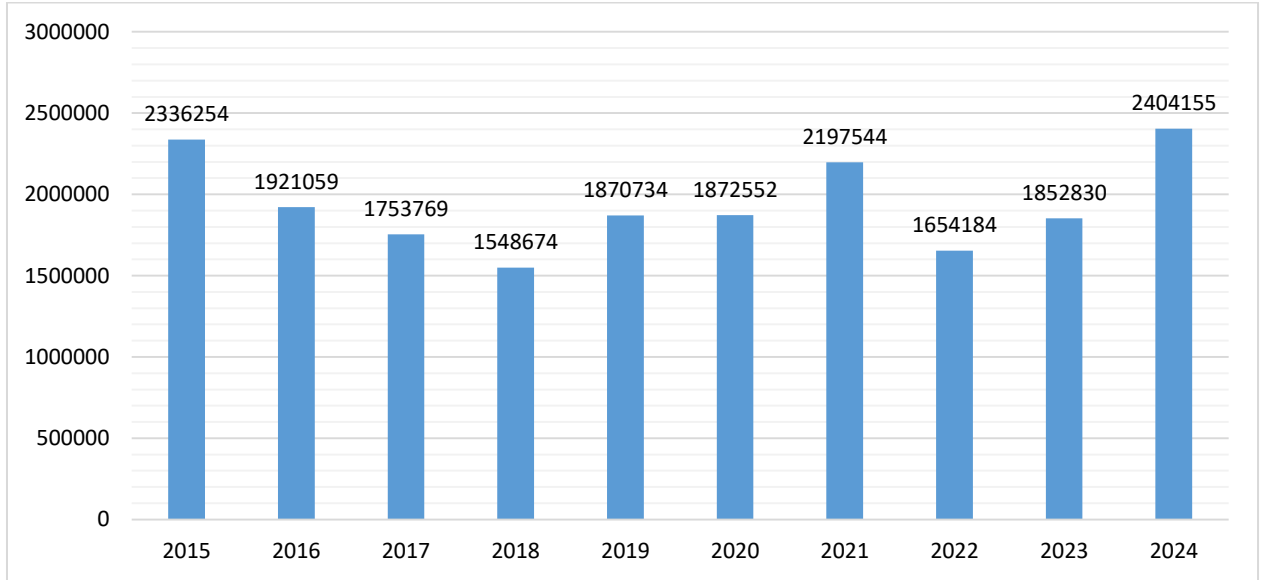
Sıra	Ülke	2015	2019	2024
1	Türkiye	1640461	1245470	1503239
2	Şili	23146	87150	230464
3	İtalya	202435	199583	172248
4	Amerika	18083	10166	141793
5	Azerbaycan	90267	124208	126684

6	Gürcistan	171866	56558	89349
7	Hollanda	40769	50147	41094
8	Almanya	58003	43527	37497
9	Çek	15783	10018	8948
10	Birleşik Arap Emirlikleri	1081	4636	8262

Kaynak: ITC Trade Map, 2025

Tablo 1’de 2015, 2019 ve 2024 yılları arasındaki fındık ihracat değerleri görülmektedir. Bu değerler dikkate alındığında Türkiye ilk sırada yer almaktadır.

Şekil 1: Dünya Toplam Fındık İhracatı



Kaynak: ITC Trade Map, 2025

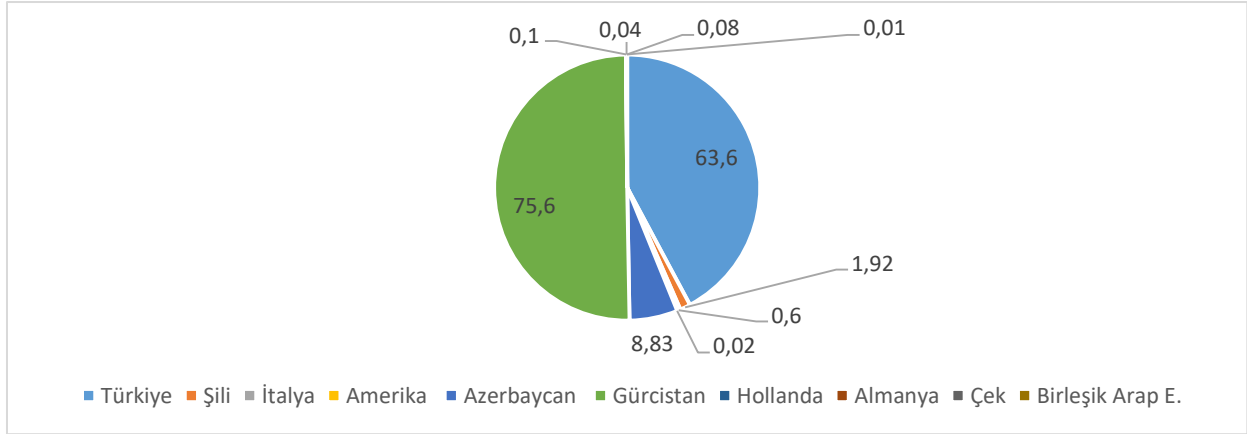
Dünya toplam fındık ihracatına bakıldığında 2015’den 2018 kadar bir azalış yaşanmış, 2019-2021 yılları arasında ise artış olmuştur. 2022 yılında tekrar azalan fındık ihracatı 2023 yılından itibaren artış göstererek en yüksek değere 2024 yılında ulaşmıştır.

Tablo 2: Dünya Fındık İhracatında RCA Sıralaması

Sıra	Ülke	RCA Değeri	RCA Değeri	RCA Değeri
		2015	2019	2024
1	Türkiye	80.0994323	69.062	57.14408
2	Şili	0.89520879	1.291308	2.826649
3	İtalya	1.08257561	0.400236	0.323408
4	Amerika	0.02939643	0.006673	0.087027
5	Azerbaycan	17.4439071	6.821597	6.045196
6	Gürcistan	234.291092	22.59214	35.44427
7	Hollanda	0.21440653	0.093757	0.074467
8	Almanya	0.10709036	0.031569	0.028331
9	Çek	0.24537555	0.05416	0.043728
10	Birleşik Arap Emirlikleri	0.00879205	0.015824	0.023824

Tablo 2’de yer alan verilere göre 2015-2024 yılları arasındaki fındık ihracat verileri dikkate alınarak hesaplanan RCA değerleri paylaşılmaktadır. İlgili yıllarda en yüksek RCA değerine sahip ülkelerin Türkiye, Gürcistan, Azerbaycan ve Şili olduğu görülmektedir. 2024 yılı için hesaplanan rakamlara göre fındık ihracatında en yüksek rekabet üstünlüğünü elde eden ülke Türkiye olarak belirlenmiştir. İtalya, Amerika, Hollanda, Almanya, Çek ve Birleşik Arap Emirlikleri’nin ise eşik değerinin altında kaldığı görülmektedir.

Şekil 2: 2015-2024 Dönemi Ortalama Fındık RCA Değerleri



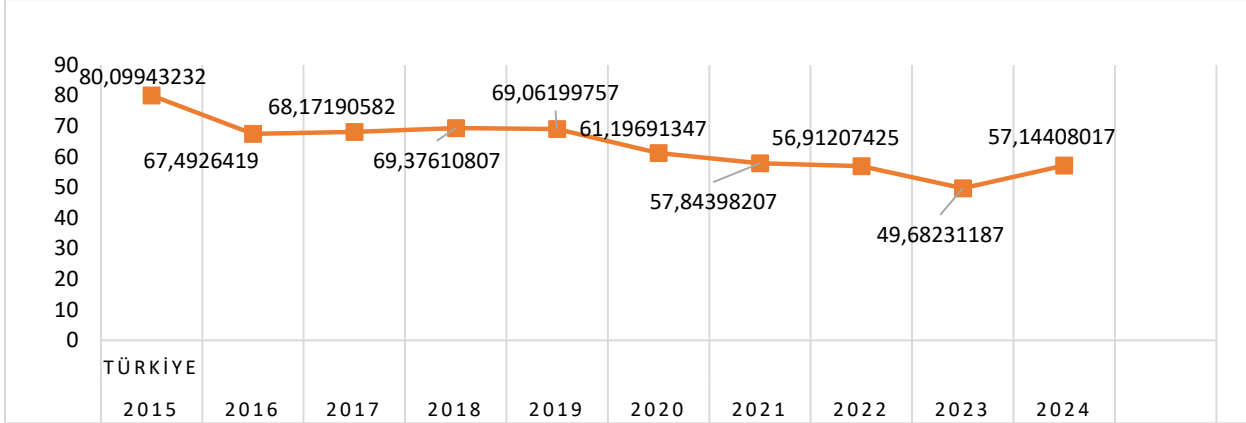
Hesaplanan 2015-2024 dönemi ortalama fındık RCA değerlerine bakıldığında 75,68 değer ile ilk sırada Gürcistan yer almıştır. İkinci sırada ise 63,69'luk değer ile Türkiye gelmektedir. Sırasıyla ardından Azerbaycan ve Şili gelmektedir. Ortalama değer dikkate alındığında diğer ülkeler ise eşik değerinin altında bir değere sahiptir. Türkiye açısından ortalama RCA değerinin yüksek olması, dünya fındık ihracatında güçlü bir rekabet avantajına sahip olduğunu göstermektedir.

Tablo 3: 2015-2024 Dönemi Fındık İhracatındaki Ülkelerin RCA Değerleri

Ülkeler	2015	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Türkiye	80,099	68,171	69,376	69,020	61,196	57,843	56,912	49,682	57,144
Şili	0,895	1,181	1,034	1,291	2,145	1,751	1,252	2,593	2,826
İtalya	1,082	0,505	0,501	0,400	0,441	0,589	0,278	0,306	0,323
Amerika	0,029	0,005	0,006	0,006	0,011	0,018	0,037	0,054	0,087
Azerbaycan	17,443	7,776	5,161	6,821	8,260	5,182	2,980	3,942	6,045
Gürcistan	234,29	33,923	19,577	22,592	31,359	30,424	21,946	27,128	35,444
Hollanda	0,214	0,100	0,077	0,093	0,091	0,074	0,061	0,066	0,074
Almanya	0,107	0,031	0,027	0,031	0,039	0,036	0,023	0,037	0,028
Çek	0,245	0,059	0,038	0,054	0,087	0,053	0,031	0,030	0,043
Birleşik Arap E.	0,008	0,001	0,003	0,015	0,004	0,022	0,021	0,006	0,023

Yapılan RCA hesaplaması sonucunda fındık ihracatında en rekabetçi ülkelerin Gürcistan, Türkiye, Azerbaycan ve Şili olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Diğer ülkelerin ise ilgili malda rekabet avantajı elde edemediği bulgusuna ulaşılmıştır.

Şekil 3: 2015-2024 Dönemi Türkiye'nin Fındık RCA Değerleri



Tablo 2, Tablo 3, Şekil 2 ve Şekil 3 de görüldüğü üzere fındık ihracatında rekabet gücünün en yüksek olduğu ülkelerden birisi Türkiye'dir. Fakat 2015-2024 dönem verilerine bakıldığında 2024 yılı hariç 2015 yılından itibaren RCA değerlerinde bir düşüş yaşandığı görülmektedir. Türkiye'nin en yüksek rekabet gücünü elde ettiği değer 80,09 ile 2015 yılında gerçekleşmiştir. En düşük değer ise 49,68 ile 2023 yılında gerçekleşmiştir. Gerek ortalama değer üzerinden gerekse ilgili dönem aralığında Türkiye'nin fındık ihracat payının toplam dünya ihracat payından büyük olduğu belirlenmiştir. Diğer bir ifadeyle Türkiye'nin fındık ihracatında uzmanlaştığı ve güçlü bir rekabet avantajına sahip olduğu görülmektedir.

SONUÇ VE TARTIŞMA

Türkiye'nin fındık ihracatının dış ticaretteki rekabet gücünün değerlendirildiği bu çalışmada ülke grubu olarak dünya fındık ihracatında önde gelen Türkiye, İtalya, Azerbaycan, Gürcistan, Şili, Amerika Birleşik Devletleri, Almanya, Hollanda, Çek Cumhuriyeti ve Birleşik Arap Emirlikleri ele alınmıştır. 2015-2024 dönem verileri incelendiğinde fındık ihracatında ilgili yıllarda ilk sırada Türkiye'nin yer aldığı görülmektedir. Ülkelerin toplam ihracat ve fındık ihracat verileri incelendikten sonra 2015-2024 dönemi için fındık ihracat verileri dikkate alınarak hesaplanan RCA değerleri karşılaştırılmıştır. Elde edilen bulgulara göre Türkiye, ilgili dönem boyunca RCA değerinin eşik değerin üzerinde olması nedeniyle güçlü bir rekabet avantajına sahip konumdadır. Ülkeler arasında fındık ihracatında en rekabetçi ülkelerin Gürcistan, Türkiye, Azerbaycan ve Şili olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Analize dahil edilen diğer ülkelerin ise ilgili malda rekabet avantajı elde edemediği görülmektedir.

KAYNAKÇA

Balassa, B. (1965). Trade liberalisation and “revealed” comparative advantage. The Manchester School, 33(2), 99–123.

International Trade Centre. (2026). Trade Map. <https://www.trademap.org/Index.aspx>

Karanfil, M., & Topçu, D. (2024). Türkiye’nin zeytinyağı ihracatının dış ticaretteki rekabet gücünün değerlendirilmesi [Evaluation of the foreign trade competitiveness of Turkey’s olive oil exports]. In EGE 12th International Conference on Social Sciences: Proceeding Book (Vol. 2, pp. 3125–3133). Academy Global Publishing House.

Green but Price-Sensitive: The Attitude–Behaviour Gap in Sustainable Apparel Consumption

Tutku EKER İŞCİOĞLU¹, İpek GÜLER²

¹E-mail: teiscioglu@pirireis.edu.tr; Piri Reis University, Faculty of Economics and Administrative Sciences, International Trade and Business, İstanbul / Türkiye.

²E-mail: ipek.guler@stu.pirireis.edu.tr; Piri Reis University, Faculty of Economics and Administrative Sciences, International Trade and Business, İstanbul / Türkiye.

Abstract

The purpose of this research is to explore the factors that influence consumers' attitudes, behaviour, and the attitude-behaviour gap within the sustainable clothing context. The data collected from 112 respondents were analysed with three different linear regression models to examine the impact of green scepticism (GS), environmental knowledge (EK), environmental concern (EC), and price sensitivity (PS). The results of the attitude model indicated that EC had a positive, PS had a negative impact on attitudes toward sustainable apparel. The behavioural model showed that attitudes towards sustainable apparel and EK had a positive effect on purchasing behaviour, while PS was the most significant barrier to sustainable purchasing behaviour. PS was also determined as the most important factor for the attitude-behaviour gap. Finally, GS had a marginal negative effect on this gap. The findings indicate that even when consumers have positive attitudes about sustainable clothing, economic concerns prevent them from buying sustainable apparel, thus widening the attitude-behaviour gap.

Keywords: Attitude-behaviour gap, green scepticism, environmental knowledge, environmental concern, price sensitivity

Özet

Bu araştırmanın amacı, sürdürülebilir giyim bağlamında tüketicilerin tutumlarını, davranışlarını ve tutum-davranış açığını etkileyen faktörleri incelemektir. 112 katılımcıdan toplanan veriler, yeşil şüphe (YŞ), çevre bilgisi (ÇB), çevre kaygısı (ÇK) ve fiyat duyarlılığının (FD) etkisini incelemek için üç farklı doğrusal regresyon modeliyle analiz edilmiştir. Tutum modelinin sonuçları, ÇK'nin sürdürülebilir giyime yönelik tutumlar üzerinde olumlu, FD'nin ise olumsuz bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Davranış modeli, sürdürülebilir giyime yönelik tutumların ve ÇB'nin satın alma davranışı üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğunu, FD'nin ise sürdürülebilir satın alma davranışına en önemli engel olduğunu göstermiştir. FD ayrıca tutum-davranış açığı için en önemli etken olarak belirlenmiştir. Son olarak, YŞ'nin tutum-davranış açığı üzerinde marjinal bir negatif etkisi bulunmaktadır. Bulgular, tüketicilerin sürdürülebilir giyim konusunda olumlu tutumlara sahip olsalar dahi, fiyata duyarlılığın onları sürdürülebilir giyim satın almaktan alıkoyduğunu ve böylece tutum-davranış açığını genişlettiğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Tutum-davranış açığı, yeşil şüphecilik, çevre bilgisi, çevre kaygısı, fiyat duyarlılığı

INTRODUCTION

The fashion industry, in particular, is at the centre of sustainability discussions due to its high carbon emissions, intensive water consumption, textile waste, and unethical production processes. With the spread of fast fashion, consumers are turning to lower-cost and readily available products, creating serious risks for environmental sustainability. Therefore, sustainable clothing consumption has become an increasingly important research topic in both theory and practice. Many factors influencing sustainable consumption behaviours have been examined in the literature. Specifically, variables such as environmental concern, environmental knowledge, eco-friendly attitudes, social norms and consumers' perceptions of sustainability have been shown to have significant effects on green purchasing behaviour. One of the most interesting issues in the sustainable consumption literature is the fact that the eco-friendly attitudes of individuals are not always translated into real purchasing behaviour. This is called the 'attitude-behaviour gap' and is seen as one of the most fundamental paradoxes in the field of sustainability. Consumers report a high level of awareness of environmental issues but their actual purchasing behaviour tends to support traditional and lower priced products.

In the sustainable consumption literature, much attention has been paid to variables such as environmental concern, environmental knowledge or green buying intention. Holistic models explaining attitudes, behaviours and the attitude-behaviour gap in sustainable clothing consumption simultaneously are scarce. In particular, studies that address the combined effect of green scepticism and price sensitivity variables on the attitude-behaviour gap in the context of sustainable clothing are quite insufficient. Existing studies in the literature mostly focus on purchasing intention, remaining limited in explaining the differentiation between actual behaviour and attitude.

This study aims to fill this research gap by examining the effects of environmental concern, environmental knowledge, green scepticism, and price sensitivity on attitudes towards sustainable apparel, actual purchasing behaviour, and the attitude-behaviour gap within the context of sustainable apparel consumption. Thus, by evaluating the psychological and economic dynamics of sustainable fashion consumption within the same model, the study offers a holistic perspective. In particular, revealing which factors shape the attitude-behaviour gap provides significant theoretical and practical contributions to sustainable apparel consumption research.

LITERATURE REVIEW

Sustainable Fashion and Consumer Behaviour

Sustainable fashion is the production and consumption of fashion items that have a minimal impact on the environment and society and correspond to the principles of circular economy. Ronda (2024), identified five main barriers to sustainable fashion consumption: high price, low visibility, limited accessibility, inadequate information about the harmful consequences of fast fashion, and low trust in sustainability claims. These barriers weaken the relationship between motivation and actual behaviour. Hao & Zhang (2025) studied the factors influencing consumers' attitudes towards sustainable fashion and showed that environmental awareness, fashion motivation, price awareness, and perceived

value are critical factors influencing attitudes. The researchers also noted that young consumers have more robust attitudes towards sustainability, but these do not always translate into the purchasing decisions. A systematic literature review by Schiaroli et al. (2024) examined the determinants, drivers, and barriers to sustainable fashion consumption and found that the main barriers are high prices, scepticism, stereotypes, lack of knowledge and availability, and efforts to access product/service. Previous research has also documented that environmental concern and environmental knowledge have a crucial impact on environmental attitudes and purchase behaviour.

Environmental Concern

Environmental concern (EC) is defined as a cognitive-emotional construct reflecting individuals' awareness and anxiety levels regarding environmental issues. In their comprehensive review Yusoff et al. (2023) identified EC as one of the strongest drivers of green buying behaviour. Sharma et al. (2023), in their systematic literature review on green purchase behaviour, positioned EC as one of the most studied variables impacting green purchase. The researchers emphasized that for attitudes to translate into purchasing behaviour, EC must be considered together with other factors such as normative pressure and price perception. In the context of sustainable fashion, Şener et al. (2023), found that perceived customer values and EC were found to be much more effective on purchase intentions, although they were weak in positively affecting customers' attitudes toward recycled content clothing.

Environmental Knowledge

Environmental knowledge (EK) refers to the subjective and objective knowledge individuals possess about environmental problems, processes, and sustainable alternatives. Often equated with environmental awareness, this construct is considered one of the fundamental cognitive determinants of attitude formation and pro-environmental behaviour. Zhang et al. (2024) revealed that consumers' level of EK not only has a direct effect on purchase intention but also has an indirect effect through perceived value and expected moral benefit. This finding indicates that EK has the potential to directly influence actual behaviour. (Dhir et al. (2021) also confirmed the positive relationship between EK and purchasing behaviour. Their findings demonstrated that environmental knowledge enhances consumers' awareness of sustainability issues and contributes to environmentally responsible purchasing decisions by strengthening green trust, environmental concern, and environmental attitudes. A systematic review additionally reveals that EK directly and indirectly influences sustainable fashion purchasing behaviour (Toebast-Wensink et al., 2025).

Green Scepticism

Green scepticism (GS) was conceptualized by Mohr et al. (1998) as a construct developed to measure consumer scepticism toward marketers' environmental claims, where sceptics question environmental claims but remain open to purchasing if these claims are verified. Leonidou & Skarmas (2017) examined the causes and consequences of GS, showing that “green scepticism prompts consumers to seek more information about the products, sparks negative word of mouth to friends and acquaintances, and forestalls purchase intentions”. Nguyen et al. (2019) confirmed that GS plays a full mediating role in the relationship between greenwashing and green purchase intention.

The role of green scepticism in the context of sustainable fashion presents a more nuanced picture. Examining the impact of green scepticism on green purchase intention towards eco-friendly green clothing, Widjaja et al (2024) found that green scepticism has a positive impact on both green purchase intention and green trust. On the other hand, Lexmana et al. (2025) reported that green scepticism has a significant negative effect on the purchase intention of fast fashion products.

Price Sensitivity

Price sensitivity (PS) refers to the weight consumers attribute to the price factor in their purchasing decisions and the intensity of their reactions to price changes. In the context of sustainable fashion, price sensitivity reflects the psychological barrier created by the cost premium that eco-friendly products carry compared to their traditional equivalents. Ronda (2024) empirically confirmed that market prices are the strongest obstacle to sustainable fashion consumption, showing that perceptions of price premiums weaken both purchasing motivation and actual purchasing behaviour. In the study of Zinoubi (2020), “the positive relationship between green purchase intention and behaviour was found inversely influenced by consumer price sensitivity”. Studies directly examining the role of PS in sustainable fashion consumption also reveal similar findings. Widjaja et al (2024) also reported that price sensitivity weakens the relationship between environmental concern and green purchase intention for eco-friendly green clothing.

Attitude-Behaviour Gap

The attitude-behaviour gap describes the phenomenon where consumers' positive attitudes towards environmental issues do not systematically translate into actual purchasing behaviour. This phenomenon is one of the most well-established findings in sustainable consumption research. Park & Lin (2020) confirmed the existence of this gap in the context of recycled and upgraded fashion products, showing that economic barriers suppress purchasing behaviour even when attitudes are strong. Banytè et al. (2023), who investigated the attitude-behaviour relationship in the context of sustainable clothing consumption, concluded that sustainable clothing purchasing behaviour is directly related to attitudes and purchase intention, with intention functioning as a mediator between attitude and behaviour. Sherrington (2023) emphasised that the attitude-behaviour gap is particularly apparent among Generation Z consumers. This group of consumers, despite the highest levels of environmental consciousness in relation to sustainability, also belongs to the consumer segments most strongly associated with fast-fashion habits. This paradox can be explained through financial constraints, accessibility issues, and cultural norms. This clearly indicates that the attitude-behaviour gap is not simply a matter of individual decision; structural and economic conditions are also decisive. Ronda (2024) found that the most critical barrier remains price, followed by lack of visibility and trust.

METHODOLOGY

This research aims to understand the factors that influence attitude towards sustainable apparel (ATT), purchase behaviour of sustainable apparel (BHV), and the attitude-behaviour gap. Among the factors, green scepticism (GS), environmental knowledge (EK), environmental concern (EC), and price sensitivity (PS) were taken into account. Study is designed as a quantitative study, where all relevant constructs were measured with a 7-point Likert scale.

The scales of ATT were adapted from Mehta & Chahal (2021) and Lavuri et al. (2023), having nine items. BHV also had nine items and were adapted from Park & Lee (2020). GS items were adopted from Mohr et al. (1998) and had seven items. Measurement scale for EK was adapted from Park & Lee (2020), having six items. EC also had six items and were adapted from Alsmadi (2008) and Sheikh et al. (2023). Finally, PS had five items, which were adapted from Tan et al. (2025).

After a pilot study with 30 participants, the questionnaire was revised in terms of its wording and layout. Then the revised questionnaire was distributed to the individuals, who are in the social and professional network of the researchers and live in Türkiye, through Google Forms link. Each participant was asked to distribute the questionnaire to their own networks, and thus snowball sampling method was utilized. In total 160 participants were included in the sample, however due to improper answers to the attention check question, the sample size was reduced to 112. Table 1. displays the sample demographics.

Table 1. *Sample demographics*

	Category	n	%		Category	n	%
Gender	Male	44	39.3%	Marital Status	Single	88	78.6%
	Female	68	60.7%		Married	24	21.4%
Education	Associate's	21	18.8%	Occupation	Employed	28	25.0%
	Bachelor's	83	74.1%		Unemployed	9	8.0%
	Master's	6	5.4%		Retired	3	2.7%
	PhD	2	1.8%		Student	72	64.3%
Age	< 30	86	76.8%	Income	< 100.000 TL	39	34.8%
	30-39	4	3.6%		100.000 - 200.000 TL	42	37.5%
	40-49	16	12.5%		200.001 - 300.000 TL	17	15.2%
	50-59	5	4.5%		300.001 - 400.000 TL	7	6.3%
	≥ 60	1	0.9%		>400.000 TL	7	6.3%

Data were analysed by Jamovi statistical program and hypotheses were tested with Linear Regression Analysis. Mean values of each construct were calculated and included in the analysis. For the calculation of attitude-behaviour gap, mean values of ATT were subtracted from the BHV. All assumptions of Linear Regression Analysis were fulfilled before reporting the findings.

FINDINGS

When the three regression models are considered together, a more comprehensive framework regarding the psychological structure underlying environmentally friendly consumption behaviours is presented. The models respectively explain the determinants of sustainable apparel attitude, sustainable apparel purchase behaviour, and the attitude-behaviour gap. The results can be observed from Table 2.

Table 2. *Linear Regression Results*

Model 1 - ATT, $R^2=0.47$			Model 2 - BHV, $R^2=0.72$			Model 3 - ATT-BHV Gap, $R^2=0.18$		
Predictor	t	p	Predictor	t	p	Predictor	t	p
Intercept	4.985	<.001	Intercept	3.067	.003	Intercept	-0.0864	.931
GS	-0.674	.502	ATT	5.179	<.001	GS	-16.849	.095
EK	1.714	.089	GS	1.565	.121	EK	-10.608	.291
EC	3.378	.001	EK	2.372	.020	EC	12.323	.221
PS	-4.060	<.001	EC	0.728	.468	PS	32.257	.002
			PS	-6.092	<.001			

In the first regression model, attitude toward sustainable apparel (ATT) was used as the dependent variable. According to the model results, the independent variables explain approximately 47.6% of the variance in ATT ($R^2 = 0.476$). Environmental Concern (EC) has a positive and significant effect on ATT ($\beta = 0.304$, $p = .001$). This result shows that as the level of concern regarding environmental problems increases, individuals' ATT also strengthen. Price sensitivity (PS) has a negative and significant effect on ATT ($\beta = -0.344$, $p < .001$). This indicates that price-focused individuals have weaker sustainable apparel attitudes. The effect of the Environmental Knowledge (EK) was found to be positive but marginally significant ($\beta = 0.144$, $p = .089$). Accordingly, as the level of EK increases, ATT tends to increase as well. The Green Scepticism (GS) variable did not have a significant effect on ATT.

In the second regression model, sustainable apparel purchase behaviour (BHV) was considered as the dependent variable. The explanatory power of the model is found to be quite high ($R^2 = 0.724$). The findings show that ATT strongly and positively influences BHV ($\beta = 0.431$, $p < .001$). This result supports the idea that positive environmental attitudes play a significant role in the formation of eco-friendly behaviours. EK also has a positive and significant effect on BHV ($\beta = 0.173$, $p = .020$). Accordingly, individuals with a high level of environmental knowledge are more likely to exhibit sustainable apparel purchase behaviour. PS, on the other hand, has a strong and negative effect on BHV ($\beta = -0.476$, $p < .001$). This result shows that economic concerns are one of the most important obstacles to sustainable consumption behaviours. EC and GS did not have a significant effect on BHV.

In the third regression model, the attitude-behaviour gap is considered as the dependent variable. When the explanatory power of the model is examined, it is seen that the independent variables explain approximately 18.2% of the variance in the attitude-behaviour gap ($R^2 = 0.182$). The findings show that only PS has a significant effect on the attitude-behaviour gap ($\beta = 0.281$, $p = .002$). The result shows that the higher the PS, the larger the difference between the attitudes towards sustainable apparel and the actual purchasing behaviours. Put simply, even if people have pro-environmental attitudes, economic considerations can be a barrier to converting attitudes into actual behaviour. The effect of GS on the attitude-behaviour gap was also negative but marginally significant ($\beta = -0.144$, $p = .095$). This could imply that more sceptical consumers might show a smaller gap between attitudes and behaviours. The attitude-behaviour gap was not significantly affected by EK and EC. This finding demonstrates that EK and EC in isolation are inadequate for environmentally responsible behaviours.

When the three models are evaluated together, it is seen that EC shapes attitudes more, while EK has a more effective influence on actual behaviour. However, PS weakens sustainable apparel attitudes, reduces purchase behaviours, and widens the attitude-behaviour gap. These results show that sustainable purchase behaviour cannot be explained solely by environmental awareness; economic and practical factors also play a decisive role in consumer behaviour.

DISCUSSION

This study aimed to contribute to the sustainable apparel consumption literature by examining the gap between consumers' environmentally friendly attitudes and their actual purchasing behaviour. Among the previously confirmed factors that influence sustainable apparel consumption, environmental concern, environmental knowledge, green scepticism, and price sensitivity were included as independent variables in three regression models: one for attitude toward sustainable apparel, one for sustainable apparel purchase behaviour, and the last one for attitude-behaviour gap related to sustainable apparel consumption.

The findings show that environmental concern is a significant determinant in the formation of positive attitudes towards sustainable apparel. This result parallels previous studies showing that concern to environmental issues positively shapes individuals' evaluations of sustainable products (Sharma et al., 2023; Şener et al, 2023; Yusoff et al., 2023). In particular, it appears that individuals with higher concern to sustainability develop more positive perceptions of environmentally friendly products.

One of the striking findings of the research is that environmental knowledge has a stronger influence on purchasing behaviour of sustainable apparel than on attitude. So, it is not enough to just think positively about the environment, and it is the knowledge of sustainable products, production processes, and environmental impacts that underpins actual purchasing behaviour. The awareness of consumers of product ingredients, recycling processes, and production standards may promote behavioural change, particularly in the area of sustainable fashion. This finding is in line with studies that highlight the role of environmental knowledge in behaviour transformation (Dhir et al., 2021; Toebast-Wensink et al., 2025).

The most important finding of the study is the significant role of price sensitivity in the consumption of sustainable clothing. The results indicate that price sensitivity negatively affects attitudes towards sustainable apparel, reduces purchasing behaviour, and increases the attitude-behaviour gap, as found previously by Zinoubi (2020) and Widjaja et al. (2024). This means that even if consumers are positively inclined towards sustainable clothing, the perception of high prices inhibits purchase behaviour. This shows that sustainable fashion products are still seen as “high-cost alternatives” in consumer groups. High environmental awareness exists, but economic constraints appear to restrict purchase decisions, especially for young consumers. Another interesting finding is the small negative effect of green scepticism on the attitude-behaviour gap. This finding suggests that more sceptical consumers are likely to question sustainability claims and thus make more selective and controlled purchasing decisions. This could mean that consumers feel the need to check sustainability messages instead of believing them. The increase in greenwashing practices, in particular, leads consumers to take a more critical approach to environmental claims.

Overall, the study shows that sustainable consumption behaviour cannot be explained solely by environmental awareness; price sensitivity, level of environmental knowledge and concern, and consumers' perceptions of scepticism must be considered together. These results reveal that the attitude-behaviour gap in the field of sustainable fashion has a multifaceted structure.

Theoretical Implications

This study offers several theoretical contributions to the literature on sustainable fashion consumption. Firstly, instead of explaining sustainable consumption behaviour solely through one-dimensional variables such as environmental concern or environmental knowledge, the research proposes a holistic model that considers environmental concern, environmental knowledge, green scepticism, and price sensitivity together. Thus, the differentiation between attitude formation and actual behaviour in sustainable clothing consumption is explained more comprehensively.

Secondly, the study demonstrates that environmental knowledge has a greater impact on behaviour than on attitude. While environmental knowledge is often considered a precursor to environmental attitudes in the literature, this study emphasizes the direct transformative role of environmental knowledge in behaviour. This shows that sustainable consumption behaviours are not only value-oriented but also related to cognitive processes.

Thirdly, the study reveals that price sensitivity is one of the key determinants of the attitude-behaviour gap in sustainable apparel consumption. Thus, a strong explanation from an economic perspective is offered for the question frequently discussed in the sustainable consumption literature: "Why don't environmental attitudes translate into purchasing behaviour?" This result suggests that economic barriers should be considered in a more central position in sustainable consumption research.

Managerial Implications

The research findings offer important implications for sustainable fashion brands and marketing managers. As the findings indicate, the perceived high price of sustainable fashion products significantly limits consumers' purchasing behaviour. Therefore, focusing solely on sustainability messaging will not be sufficient for brands. To reduce consumer price sensitivity, accessible pricing, discount campaigns or communication strategies that highlight the benefits of long-term use should be developed. And, as consumers grow more cynical about sustainability claims, it's important for brands to avoid the perception of greenwashing. Realistic, verifiable, and transparent sustainability communication is important to maintain brand trust. Independent certifications and third-party verifications in particular can enhance consumer trust.

In addition, as environmental knowledge positively affects purchase behaviour, brands should provide educational content to support consumers. Sharing information on the environmental impact of products, production processes, recyclability features, and sustainability certifications openly can have a positive impact on the purchasing decisions of consumers.

Limitations and Suggestions for Future Research

There are some limitations to this study. First, the sample is not representative because of the snowball sampling. The results might not be directly generalizable to other age and income groups since most participants are young people and students. Second, the study is based on a cross-sectional data design. Relationships between variables can be found but changes in behaviour over time cannot be detected. Longitudinal designs could be used in future research to study changes in sustainable consumption behaviours over time. Third, only sustainable clothing consumption is considered in this research. Similar models could be tested in other areas of sustainable consumption like cosmetics, food, tourism or technology in future works. Moreover, the model can incorporate variables such as social norms, sustainable lifestyle, materialism, consumption habits, and the effect of digital influencers to provide more complete explanations. Finally, further research can be conducted using experimental designs and real purchase scenarios to more closely examine the actual behaviours of consumers towards sustainable products. In particular, studies that evaluate price manipulations and sustainability messages together can contribute to a deeper understanding of the attitude-behaviour gap.

REFERENCES

- Banytė, J., Vaidelinskaitė, Š., & Šalčiuvienė, L. (2023). Investigating the Link between Consumer Attitudes and Behaviour in the Context of Sustainable Clothing: The Role of Social Norms. *Sustainability*, 15(24), 16800. <https://doi.org/10.3390/su152416800>
- Dhir, A., Sadiq, M., Talwar, S., Sakashita, M., & Kaur, P. (2021). Why do retail consumers buy green apparel? A knowledge-attitude-behaviour-context perspective. *Journal of Retailing and Consumer Services*, 59, 102398. <https://doi.org/10.1016/j.jretconser.2020.102398>
- Hao, L., & Zhang, L. (2025). Consumer Attitudes Towards Sustainable Fashion: Implications for the Fashion and Apparel Industry. *Sustainable Development*, 33(S1), 130–145. <https://doi.org/10.1002/sd.3558>
- Lavuri, R., Roubaud, D., & Grebinevych, O. (2023). Sustainable consumption behaviour: Mediating role of pro-environment self-identity, attitude, and moderation role of environmental protection emotion. *Journal of Environmental Management*, 347, 119106. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119106>
- Leonidou, C. N., & Skarmeas, D. (2017). Gray Shades of Green: Causes and Consequences of Green Skepticism. *Journal of Business Ethics*, 144(2), 401–415. <https://doi.org/10.1007/s10551-015-2829-4>
- Lexmana, A. M., Fikri, I., Putri, V. U., & Larasati, A. (2025). The Influence of Green Skepticism on Purchase Intention in Fast Fashion in Indonesia: The Role of Brand Loyalty as a Moderator. *Journal Research of Social Science, Economics & Management*, 5(5), 9336.
- Mehta, P., & Chahal, H. S. (2021). Consumer attitude towards green products: Revisiting the profile of green consumers using segmentation approach. *Management of Environmental Quality: An International Journal*, 32(5), 902–928. <https://doi.org/10.1108/MEQ-07-2020-0133>

- Mohr, L. A., Eroğlu, D., & Ellen, P. S. (1998). The Development and Testing of a Measure of Skepticism Toward Environmental Claims in Marketers' Communications. *Journal of Consumer Affairs*, 32(1), 30–55. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6606.1998.tb00399.x>
- Nguyen, T. T. H., Yang, Z., Nguyen, N., Johnson, L. W., & Cao, T. K. (2019). Greenwash and Green Purchase Intention: The Mediating Role of Green Skepticism. *Sustainability*, 11(9), 2653. <https://doi.org/10.3390/su11092653>
- Park, H. J., & Lin, L. M. (2020). Exploring attitude–behavior gap in sustainable consumption: Comparison of recycled and upcycled fashion products. *Journal of Business Research*, 117, 623–628. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2018.08.025>
- Park, S., & Lee, Y. (2020). Scale Development of Sustainable Consumption of Clothing Products. *Sustainability*, 13(1), 115. <https://doi.org/10.3390/su13010115>
- Ronda, L. (2024). Overcoming barriers for sustainable fashion: Bridging attitude-behaviour gap in retail. *International Journal of Retail & Distribution Management*, 52(1), 44–61. <https://doi.org/10.1108/IJRDM-02-2023-0056>
- Schiaroli, V., Fraccascia, L., & Dangelico, R. M. (2024). How can consumers behave sustainably in the fashion industry? A systematic literature review of determinants, drivers, and barriers across the consumption phases. *Journal of Cleaner Production*, 483, 144232. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.144232>
- Şener, T., Bişkin, F., & Dündar, N. (2023). The effects of perceived value, environmental concern and attitude on recycled fashion consumption. *Journal of Fashion Marketing and Management: An International Journal*, 27(4), 595–611. <https://doi.org/10.1108/JFMM-01-2021-0003>
- Sharma, K., Aswal, C., & Paul, J. (2023). Factors affecting green purchase behavior: A systematic literature review. *Business Strategy and the Environment*, 32(4), 2078–2092. <https://doi.org/10.1002/bse.3237>
- Sheikh, A., Mirzaei, M., & Ahmadinejad, B. (2023). Factors Influencing Green Purchase Behavior: Price Sensitivity, Perceived Risk, and Attitude towards Green Products. *Contemporary Management Research*, 19(3), 153–174. <https://doi.org/10.7903/cmr.22824>
- Sherrington, A. M. (2023) The attitude-behaviour gap in sustainable consumer behaviour: a study of generations Y and Z. International Conference on Social Responsibility, Ethics and Sustainable Business. p. 17. ISSN 3083-9475.
- Tan, C. N.-L., Fauzi, M. A., & Harun, S. A. B. (2025). From perceived green product quality to purchase intention: The roles of price sensitivity and environmental concern. *Marketing Intelligence & Planning*, 43(7), 1329–1348. <https://doi.org/10.1108/MIP-10-2024-0703>
- Toebast-Wensink, A., Van Den Broek, K. L., Timmerman, T., & Hekkert, M. P. (2025). Experience matters: A systematic review and research agenda on predictors to buy sustainable fashion. *Frontiers in Sustainability*, 6, 1556835. <https://doi.org/10.3389/frsus.2025.1556835>
- Widjaja, J. O., Bimantara, I. B. M. A., Wewengkang, L. B. T., & Mustikasari, F. (2024). The impact of green skepticism on green purchase intention towards eco-friendly green clothing fashion in Indonesia. *Amity Journal of Management*, 8(1), 16–30.

Yusoff, N., Alias, M., & Ismail, N. (2023). Drivers of green purchasing behaviour: A systematic review and a research agenda. *F1000Research*, 12, 1286.
<https://doi.org/10.12688/f1000research.140765.1>

Zhang, G., Wang, L., & Meng, H. (2024). Environmental knowledge level and consumer behavior regarding green fashion: A moderated mediation model. *Asia Pacific Journal of Marketing and Logistics*, 36(4), 977–992. <https://doi.org/10.1108/APJML-07-2023-0637>

Zinoubi, Z. G. (2020). Motives of Green Consumption: The Moderating Roles of Perceived Consumer Effectiveness and Price Sensitivity. *Archives of Business Research*, 8(1), 261–277.
<https://doi.org/10.14738/abr.81.7429>

Sınıf Öğretmenlerinin Matematik Ders Kitabı Etkinlikleri Hakkındaki Görüşleri: Birinci Sınıf Örneği

Ferit ÖZKAYA¹, Dr. Öğretim üyesi Özlem TOKGÖZ²

¹E-mail: feritozkaya02@hotmail.com; Kocaeli Üniversitesi, Eğitim Fakültesi, Eğitim Bilimleri Bölümü, İl / Türkiye.

²E-mail: ozlem.tokgoz@kocaeli.edu.tr; Kocaeli Üniversitesi, Eğitim Fakültesi, Eğitim Bilimleri Bölümü, İl/ Türkiye.

Özet

Bu araştırmada, sınıf öğretmenlerinin birinci sınıf matematik ders kitabı etkinliklerine ilişkin görüşleri incelenmiştir. Nitel bir vaka çalışması olarak tasarlanan araştırma grubu, amaçlı ve kartopu örnekleme yöntemleriyle seçilmiştir. Katılımcılar, 2025-2026 eğitim-öğretim yılında Kocaeli'nin Kartepe ilçesindeki ilkokullarda çalışan 12 sınıf öğretmenidir. Veriler, beş açık uçlu sorudan oluşan yarı yapılandırılmış bir görüşme formu aracılığıyla toplanmış ve içerik analizi kullanılarak analiz edilmiştir.

Bulgular, öğretmenlerin çoğunun etkinlikleri müfredatla uyumlu ve görsel ve yapısal tasarımda modern eğitim yaklaşımlarını yansıttığını düşündüğünü göstermektedir. Öğretmenler etkinlikleri öğrenme ilkeleri, öğrenci düzeyi ve gerçek hayata uygunluk açısından olumlu değerlendirmiş; ancak daha net talimatlara ve daha güçlü değerlendirme süreçlerine ihtiyaç duyulduğunu vurgulamışlardır. Öğretmenler, farklı sosyoekonomik ve coğrafi bağlamlardan gelen öğrenciler için kapsayıcı örneklerin eksikliğine de dikkat çekmişlerdir. Ayrıca kalabalık sınıflar, sınırlı fiziksel koşullar ve gelişimsel farklılıklar, etkili uygulamaya engel olarak bildirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Matematik Ders Kitabı, Sınıf Öğretmeni, Öğretmen Görüşleri

Abstract

This study examined primary school teachers' views on first-grade mathematics textbook activities. Designed as a qualitative case study, the research group was selected through purposive and snowball sampling methods, comprising 12 primary school teachers working in Kocaeli's Kartepe district during the 2025–2026 academic year. Data collected via a semi-structured interview form with five open-ended questions were analyzed using content analysis.

Findings showed that most teachers deemed activities curriculum-aligned and modern in visual and structural design. Teachers evaluated them positively regarding learning principles, student levels, and real-life relevance, yet emphasized the need for clearer instructions and stronger assessment processes. They highlighted a lack of inclusive examples for diverse socioeconomic and geographical contexts, while noting overcrowded classrooms, limited physical conditions, and developmental differences as barriers to effective implementation.

Keywords: Mathematics Textbook, Classroom Teacher, Teacher Opinions

GİRİŞ

Öğretmenlerin eğitim-öğretim sürecindeki etkinlikleri ve görevleri ders kitaplarından seçmeleri nedeniyle müfredatın uygulanmasında ders kitapları önemli bir rol üstlenmektedir (Kılıçoğlu, 2020). Ders kitapları, öğretim programına dayalı olarak belirli sınıf düzeyine göre yapılandırılmakta ve doğru bilgiyi uygun yöntemler aracılığıyla öğrencilere aktarmayı hedeflemektedir. Nitelikli hazırlanmış bir ders kitabı öğrencilerin hedeflenen öğrenme çıktısına ulaştırmasını kolaylaştırmakta ve eğitim programının amaçlarının sınıf ortamında somutlaşmasına rehberlik etmektedir (Şahin, 2008). Öğrencilerin birebir etkileşimde olduğu bu materyaller yalnızca salt bilgi aktarımı sağlamaz; aynı zamanda içerdikleri etkinlikler aracılığıyla öğrenme-öğretme sürecini destekler ve öğrenmeye rehberlik eder (Demirel ve Kiroğlu, 2021). Öğrencilere ön bilgilerini tamamlama ve etkinliklere hazırlanma fırsatı sunar (Kaya ve Azar, 2010). Sınıf ortamındaki disiplin sorunlarını büyük ölçüde ortadan kaldırdığı için istenilen öğrenme ortamının oluşmasına yardımcı olur. Ders kitapları, öğretim programındaki konuları öğrenme ve öğretme ilkelerine uygun biçimde düzenler ve öğrencilere sistematik, yapılandırılmış bilgi sunan temel kaynaklar olarak işlev görür (Güzel ve Şimşek, 2014). Eğitimde kaliteyi yükseltmek amacıyla içerik, tasarım ve yapısal özellikleri bakımından günümüz ihtiyaçlarına uygun ders kitaplarının geliştirilmesi gerekmektedir (Memiş, 2024). Dolayısıyla, öğrenci öğrenmesinin niteliğini doğrudan belirlemesi ve eğitim reformlarının hedeflenen başarıya ulaşması açısından ders kitaplarının incelenmesi son derece gerekli ve değerli görülmektedir.

2024 yılında Türkiye'de matematik dersi öğretim programlarında; konu yoğunluğunun seyreltilmesi, bilginin günlük yaşamla ilişkilendirilmesi ve üst düzey düşünme becerilerinin kazandırılması amacıyla kapsamlı reformlara gidilmiştir. Bu reform vizyonunun en somut yansıması olan ders kitapları, öğretim sürecinin merkezine konumlandırılmış ve programın uygulama sürecinde temel bir rehber işlevi üstlenmiştir. Dolayısıyla eğitim programındaki bu vizyonun ders kitaplarındaki etkinliklere nasıl yansıdığı ve öğretmenler tarafından sınıf ortamında nasıl algılandığı, öğretimin niteliğini doğrudan etkileyen kritik bir unsurdur. Nitekim son yıllarda matematik eğitimi alanındaki bilimsel araştırmaların, artan bir ilgiyle ders kitabı incelemelerine odaklandığı görülmektedir (Gueudet vd., 2018). Bu ilginin temelinde, matematiksel metinlerin ve bu metinlerin sunum biçimlerinin; içeriklerin anlamlandırılma süreçlerini ve okulun matematik kültürünün oluşumunu doğrudan şekillendirdiği düşüncesi yer almaktadır (Remillard, 2011). Alan yazında, ders kitaplarının çeşitli değişkenlere göre incelenmesini, öğretimdeki etkililiğini araştırarak ve bu kitapları kullanan öğretmenler ile öğrencilerin görüşlerini ele alan çalışmalar bulunmaktadır (Kılıçoğlu, 2020). Ancak güncellenmiş matematik öğretim programı odağında hazırlanan ders kitaplarına ilişkin araştırmaların sınırlı kaldığı görülmektedir. Bu araştırma, Maarif Modeli doğrultusunda hazırlanan birinci sınıf matematik ders kitabı etkinliklerinin sahada görev yapan öğretmenler tarafından nasıl algılandığını, bu etkinliklerin pedagojik felsefesinin ne ölçüde benimsendiğini ve sınıf içi pratiklerde nasıl hayata geçirilebildiğini yansıtmaları açısından kritik bir öneme sahiptir. Sınıf öğretmenlerinin doğrudan deneyimlerinden yola çıkarak elde edilecek veriler; kitapta yer alan etkinliklerin içeriğine ve düzenleniş biçimine, öğrenme ilkelerine ve öğrencilerin dil/anlama seviyesine, gerçek yaşama uygunluğuna, etkinliklerin sınıf ortamındaki uygulanabilirliğine ilişkin derinlemesine değerlendirmeleri ortaya koyması bakımından önemlidir. Bulgular, ders kitapları ve etkinlik tasarımlarının gelecekteki revizyon süreçlerine yön verecek kanıta dayalı iyileştirme önerilerinin geliştirilmesi bakımından önemli bir katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Ayrıca bu çalışma,

öğretmenlerin matematik ders kitaplarındaki etkinlikleri uygulama sürecinde karşılaştıkları yapısal sınırlılıkları, pedagojik uyumsuzlukları ve gerçek yaşamla ilişkilendirme düzeylerini derinlemesine incelemeyi amaçlamaktadır. Bu araştırmada, sınıf öğretmenlerinin güncel birinci sınıf matematik ders kitabında yer alan etkinliklere ilişkin görüşlerinin incelenmesi amacıyla aşağıdaki sorulara cevap aranmıştır.

1. Öğretmenlerin, matematik ders kitaplarındaki etkinliklerin güncel matematik öğretim programına uygunluğuna ilişkin görüşleri nelerdir?
2. Öğretmenlerin, etkinliklerin içeriğine ve düzenleniş biçimine ilişkin görüşleri nelerdir?
3. Öğretmenlerin, matematik etkinliklerinin öğrenme ilkelerine ve öğrencilerin dil/anlama seviyesine uygunluğuna ilişkin görüşleri nelerdir?
4. Öğretmenlerin, matematik ders kitaplarındaki etkinliklerin gerçek yaşama uygunluğuna ilişkin görüşleri nelerdir?
5. Öğretmenlerin, matematik ders kitaplarındaki etkinliklerin sınıf ortamındaki uygulanabilirliğine ilişkin görüşleri nelerdir?

YÖNTEM

Bu araştırma nitel araştırma yaklaşımlarından durum çalışması deseniyle tasarlanmıştır. Nitel araştırma, eğitim ve sosyal bilimlerde algıların, olayların ve bireylerin deneyimlerinin doğal ortamda gerçekçi ve bütüncül bir biçimde ortaya konmasına yönelik derinlemesine bir sürecin izlendiği araştırmalardır (Creswell, 2017). Durum çalışması ise, sınırlandırılmış bir sistemin veya güncel bir olgunun kendi gerçek yaşam bağlamı içerisinde çoklu veri kaynakları kullanılarak derinlemesine incelenmesini esas alan nitel bir desendir. Bu araştırmada, sınıf öğretmenlerinin birinci sınıf matematik ders kitabında yer alan etkinliklere yönelik görüşleri, özgül bir durum olarak ele alınmış ve uygulayıcıların bakış açıları doğrultusunda derinlemesine incelenmiştir.

Bu araştırmada görüşme yapılacak katılımcılara amaçlı örnekleme yöntemleri arasında yer alan ölçüt ve kartopu örnekleme birlikte kullanılarak ulaşılmıştır. Ölçüt örnekleme bağlamında, katılımcıların aktif olarak ilkökul birinci sınıf okutuyor olmaları ve ilgili matematik ders kitabını derslerinde fiilen deneyimlemiş olmaları olarak belirlenmiştir. Görüşme yapılan ilk sınıf öğretmenlerinin yönlendirmeleri ve tavsiyeleri doğrultusunda, aynı kriterleri taşıyan ve araştırmaya zengin veri sağlayabilecek diğer sınıf öğretmenlerine de kartopu yöntemi kullanılarak ulaşılmıştır. Bu doğrultuda araştırmanın çalışma grubunu, 2025-2026 eğitim-öğretim yılında Kocaeli ilinin Kartepe ilçesindeki devlet okullarında görev yapan 12 sınıf öğretmeni oluşturmaktadır. Ö₁'den Ö₁₂'ye kadar kodlanan öğretmenlere ait bazı tanımlayıcı özellikler Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. Öğretmenlerin Kişisel Özellikleri

Katılımcılar	Cinsiyet	Kıdem	Mezuniyet Programı
Ö ₁	E	16 yıl ve üzeri	Lisans
Ö ₂	E	6-10 yıl	Yüksek Lisans
Ö ₃	K	11-15 yıl	Lisans
Ö ₄	E	5 yıl ve altı	Lisans
Ö ₅	K	16 ve üzeri	Lisans
Ö ₆	K	6-10 yıl	Lisans
Ö ₇	K	11-15 yıl	Yüksek Lisans
Ö ₈	K	6-10 yıl	Lisans
Ö ₉	E	16 ve üzeri	Lisans
Ö ₁₀	E	11-15 yıl	Lisans
Ö ₁₁	K	6-10 yıl	Yüksek Lisans
Ö ₁₂	K	6-10 yıl	Lisans

Araştırmanın verileri, araştırmacı tarafından geliştirilen beş açık uçlu sorudan oluşan “Yarı Yapılandırılmış Görüşme Formu” aracılığıyla toplanmıştır. Nitel araştırmalarda sıklıkla tercih edilen yarı yapılandırılmış görüşme tekniği, araştırmacıya önceden odak noktaları belirlenmiş standart bir soru protokolü sunarken, aynı zamanda görüşme sürecinde katılımcıların yanıtlarına bağlı olarak esnek bir hareket alanı tanımaktadır.

Veri toplama sürecine başlanmadan önce uygulamanın gerçekleştirileceği ilgili okul yönetimlerinden izinler alınmış ve katılımcı öğretmenlerin onayına başvurulmuştur. Araştırma etiği gereği gönüllülük esasına dayalı olarak yürütülen bu süreçte, görüşmeler öğretmenlerin kendilerini doğal ve rahat hissedebilecekleri kendi okul ortamlarında yüz yüze gerçekleştirilmiştir. Her bir görüşme öncesinde katılımcılara; araştırmanın amacı, kimliklerinin gizli tutulacağı ve elde edilecek verilerin yalnızca bilimsel amaçlar doğrultusunda kullanılacağı hususunda kapsamlı bilgilendirme yapılmıştır. Katılımcılarla gerçekleştirilen görüşmeler ortalama 25 ile 40 dakika arasında sürmüştür. Görüşmeler esnasında, öğretmenlerin deneyimlerini daha açık bir biçimde ifade edebilmelerini sağlamak ve odaklanılan konuya ilişkin derinlemesine veri elde etmek amacıyla sonda sorularından yararlanılmıştır. Veri kaybını önlemek, araştırmanın güvenilirliğini artırmak ve katılımcı ifadelerini eksiksiz bir şekilde kayıt altına alabilmek amacıyla öğretmenlerin açık rızası dâhilinde görüşmelerde ses kayıt cihazı kullanılmıştır. Veri toplama sürecinin tamamlanmasının ardından, elde edilen tüm ses kayıtları araştırmacı tarafından deşifre edilerek yazılı metin formatına dönüştürülmüş ve veriler analiz aşamasına hazır hâle getirilmiştir.

Araştırma kapsamında gerçekleştirilen görüşmelerden elde edilen nitel verilerin çözümlenmesinde "içerik analizi" yaklaşımı benimsenmiştir. İçerik analizinde, araştırmacının temel hedefi toplanan verileri açıklayıcı kavramlara dönüştürmek ve bu kavramlar arasındaki ilişkileri ortaya koymaktır. Araştırmacının amacı, elde edilen verileri açıklayıcı kavramlara dönüştürmek ve bu kavramlar arasındaki ilişkileri belirleyerek anlamlı bir bütün ortaya çıkarmaktır (Yıldırım ve Şimşek, 2006).

Bu araştırmada iç güvenilirliği (tutarlılığı) sağlamak amacıyla veri analizi süreci iki araştırmacı tarafından bağımsız olarak yürütülmüştür. Görüşme dökümlerinin kodlanması aşamasında araştırmacılar arasındaki görüş birliği ve görüş ayrılıkları saptanarak Miles ve Huberman (2016) tarafından önerilen

güvenirlilik formülü üzerinden kodlayıcılar arası uyum oranı %89 olarak hesaplanmıştır. Bu değer in alanyazında güvenilir kabul edilen %80 eşiğinin üzerinde olması, veri analiz sürecinin tutarlılığını kanıtlamıştır. Ayrıca araştırma verilerinin doğrudan sahada ilgili kitabı aktif olarak kullanan 1. Sınıf öğretmenleriyle yapılan yüz yüze görüşmelerden (birincil kaynaklardan) elde edilmesi veri kaynağı güvenirliliğini ve araştırmanın teyit edilebilirliğini artırmıştır. Araştırmanın inandırıcılığını artırmak amacıyla, analiz sürecinde ulaşılan bulgular katılımcı öğretmenlerin ifadelerinden yapılan doğrudan alıntılarla (Ö1, Ö2 vb.) desteklenmiş ve araştırmacının öznel yorumlarından arındırılarak okuyucuya şeffaf bir biçimde sunulmuştur. Ulaşılan kategori ve temaların, ilkokul matematik dersi öğretim programı öğrenme çıktıları ve matematik eğitimi alanyazınıyla kavramsal açıdan uyumlu olması araştırmanın kapsam geçerliğini güçlendirmiştir.

BULGULAR

Birinci soru bağlamında, öğretmenlerin “Etkinliklerin Matematik Öğretim Programına Uygunluğu” ana teması bir alt tema ve iki kod/kategori altında gruplandırılmıştır.

Tablo 2. *Etkinliklerin Matematik Öğretim Programına Uygunluğu*

Alt Temalar	Kodlar	Katılımcı	f
Uygunluk Düzeyi	Uygun	Ö ₁ , Ö ₃ , Ö ₄ , Ö ₅ , Ö ₇ , Ö ₈ , Ö ₉ , Ö ₁₀ , Ö ₁₁ , Ö ₁₂	10
	Kısmen Uygun	Ö ₂ , Ö ₆	2
Toplam			12

Tablo 2 incelendiğinde, araştırmaya katılan sınıf öğretmenlerinin matematik ders kitabındaki etkinliklerin öğretim programına uygunluğu hakkındaki görüşleri "uygun", "kısmen uygun" olmak üzere iki farklı kod altında toplanmıştır. Öğretmenlerin büyük bir çoğunluğu (f =10) etkinliklerin öğretim programındaki öğrenme çıktılarıyla uyumlu olduğunu ifade etmiştir.

“Kitaptaki etkinlikler, öğretim programındaki öğrenme çıktılarıyla aynı sırada ve içerikte ilerliyor. ...” (Ö₁)

“Kitaptaki etkinliklerin, programın öğrencilerden beklediği beceri temelli yapıyla örtüştüğünü söyleyebilirim.. ...”(Ö₃)

“Konu sıralaması programla aynı gidiyor, o yönden sıkıntı yok. Ama etkinliklerin içeriğine girince kitaba tam yansıtılamamış. Özellikle oyunlar ve merak uyandırma etkinlikleri zayıf kalmış. O kısımların pek uyuştüğünü düşünmüyorum.” (Ö₅)

İkinci soru bağlamında, öğretmenlerin “Etkinliklerin İçeriği ve Düzenlenişi” ana teması iki alt tema ve on kod altında gruplandırılmıştır.

Tablo 3. Etkinliklerin İçeriği ve Düzenlenişi

Alt Temalar	Kodlar	Katılımcı	f
Öğretmen ve Öğrenci Etkileşimi	Seviyeye uygunluğu	Ö ₁ , Ö ₂ , Ö ₃ , Ö ₅ , Ö ₆ , Ö ₇ , Ö ₁₀ , Ö ₁₁	8
	Öğretmen rehberliğine ihtiyaç duyulması	Ö ₂ , Ö ₃ , Ö ₆ , Ö ₈ , Ö ₉ , Ö ₁₁ , Ö ₁₂	7
	Farklı öğrenme düzeylerine uygunluğu	Ö ₁ , Ö ₂ , Ö ₄ , Ö ₇ , Ö ₉ , Ö ₁₂	6
	Farklı öğrenme stillerine uygunluğu	Ö ₂ , Ö ₃ , Ö ₆ , Ö ₈ , Ö ₁₀	5
	Bağımsız öğrenmeyi desteklemesi	Ö ₁ , Ö ₄ , Ö ₅ , Ö ₁₁	4
Planlama ve Yapısal Boyut	Oyunlaştırma unsurları içermesi	Ö ₂ , Ö ₄ , Ö ₅ , Ö ₇ , Ö ₈ , Ö ₉ , Ö ₁₀ , Ö ₁₁	8
	Eğitsel tasarımın kalitesi	Ö ₁ , Ö ₂ , Ö ₄ , Ö ₆ , Ö ₈ , Ö ₁₂	6
	Matematiğe karşı olumlu tutum geliştirmesi	Ö ₄ , Ö ₅ , Ö ₇ , Ö ₉ , Ö ₁₀	5
	Merak uyandırması	Ö ₃ , Ö ₆ , Ö ₈ , Ö ₉ , Ö ₁₀	5
	Yapısal çeşitliliği	Ö ₅ , Ö ₈ , Ö ₁₁	3
Toplam			57

Birinci sınıf matematik ders kitabındaki etkinliklerin içeriği ve düzenlenişi temasında öğretmenler öğretmen ve öğrenci etkileşimi alt temasına (f=31), planlama ve yapısal boyut alt temasına (f=27) vurguda bulunmuşlardır.

“Etkinliklerin matematiksel mantığı güzel ama yönergeler bazen birinci sınıf seviyesi için çok ağır kalıyor. Okuma yazmayı yeni söken, heceleyerek okuyan bir çocuğun o uzun cümleleri okuyup da ne yapacağını anlaması imkânsız.” (Ö₁₀)“...Sınıftaki her seviyeden öğrenciye bir şekilde dokunmaya çalışmışlar, bu yönü benim işimi biraz da olsa kolaylaştırıyor.” (Ö₉)

“... Farklı seviyelere hitap etme konusunda kitap maalesef yetersiz kalıyor.” (Ö₇)

“Tasarım güzel, renkli falan ama bizim çocukların kas gelişimi daha tam tamamlanmadı ki. Etkinliklerde cevap yazmaları ya da şekil çizmeleri için bırakılan boşluklar o kadar dar ki...” (Ö₈)

“Kitaptaki etkinlikler çocukları yormadan, minik minik adımlarla ilerlediği için çocuklar 'aa ben matematiği yapabiliyorum' hissine kapılıyor. O başarabilme duygusu çocuklarda matematiğe karşı inanılmaz pozitif bir tutum oluşturdu.” (Ö₉)

Üçüncü soru bağlamında, öğretmenlerin “Etkinliklerin Öğrenme İlkelerine ve Öğrenci Seviyesine Uygunluğu” ana teması iki alt tema ve kırk dokuz kod altında gruplandırılmıştır.

Tablo 4. Etkinliklerin Öğrenme İlkelerine ve Öğrencilerin Dil/Anlama Seviyesine Uygunluğu

Alt Temalar	Kodlar	Katılımcı	f
Öğrenme İlkelerine Uygunluk	Güncellik	Ö ₁ , Ö ₂ , Ö ₃ , Ö ₄ , Ö ₅ , Ö ₈ , Ö ₁₁ , Ö ₁₂	8
	Öğrenciye görelilik	Ö ₁ , Ö ₂ , Ö ₄ , Ö ₅ , Ö ₆ , Ö ₁₀ , Ö ₁₂	7
	Somuttan soyuta	Ö ₂ , Ö ₄ , Ö ₈ , Ö ₉ , Ö ₁₀	5
	Bilinenden bilinmeyene	Ö ₃ , Ö ₇ , Ö ₁₁	3
	Yakından uzağa	Ö ₆ , Ö ₇	2
Dil/Anlama Seviyesine Uygunluk	Açıklık ve anlaşılabilirlik	Ö ₁ , Ö ₃ , Ö ₅ , Ö ₆ , Ö ₇ , Ö ₁₀ , Ö ₁₁ , Ö ₁₂	8
	Yaş ve gelişim düzeyine uygunluk	Ö ₂ , Ö ₄ , Ö ₅ , Ö ₆ , Ö ₈ , Ö ₁₁ , Ö ₁₂	7
	Görsel destek	Ö ₁ , Ö ₂ , Ö ₆ , Ö ₇ , Ö ₁₂	5
	Kültürel ve deneyimsel uygunluk	Ö ₁ , Ö ₄ , Ö ₈ , Ö ₁₁	4
	Toplam		49

Birinci sınıf matematik ders kitabındaki etkinliklerin içeriği ve düzenlenişi temasında öğretmenler öğrenme ilkelerine uygunluk değerlendirme alt temasına (f=25), dil/anlama seviyesine uygunluk alt temasına (f=24) vurguda bulunmuşlardır.

“... Kitap da bu yeni ve güncel eğitim yaklaşımını çok iyi yakalamış. 'Bugünün çocuğu nasıl daha iyi anlar?' sorusuna çok güncel ve modern bir şekilde cevap vermişler.” (Ö₂)

“Kimi okul öncesinden gelmiş zehir gibi her şeyi yapıyor, kimi daha kalemi yeni yeni düzgün tutuyor. Kitap ise sanki tüm çocuklar tek tipmiş gibi, tam ortalama bir öğrenciye göre yazılmış.” (Ö₆)

“Etkinliklerdeki görseller resmen çocuklara sessiz bir rehberlik yapıyor, o metin okuma yükünü alıp çocukların işini çok kolaylaştırıyor.” (Ö₁)

“...Etkinliklerin çocukların bu yaş seviyesine hitap etmesini ben çok başarılı buldum.” (Ö₁₂)

Dördüncü soru bağlamında, öğretmenlerin “Etkinliklerin Gerçek Yaşama Uygunluğu” ana teması bir alt tema ve kırk dokuz kod altında gruplandırılmıştır.

Tablo 5. Etkinliklerin Gerçek Yaşama Uygunluğu

Alt Temalar	Kodlar	Katılımcı	f
Yaşamla İlişkilendirme	Günlük yaşamla bağlantı	Ö ₁ , Ö ₄ , Ö ₅ , Ö ₆ , Ö ₉ , Ö ₁₀ , Ö ₁₂	7
	Yakın çevreyle ilişki	Ö ₃ , Ö ₄ , Ö ₇ , Ö ₈ , Ö ₁₁	5
	Kişisel deneyimle ilişkilendirme	Ö ₂ , Ö ₃ , Ö ₇ , Ö ₁₀	4
	Yaşam boyu öğrenmeye katkı	Ö ₁ , Ö ₂ , Ö ₁₀ , Ö ₁₂	4
Toplam			20

Birinci sınıf matematik ders kitabındaki etkinliklerin gerçek yaşama uygunluğu temasında öğretmenler yaşamla ilişkilendirme alt temasına (f=20) vurguda bulunmuşlardır.

Yaşamla ilişkilendirme alt teması (f=20) incelendiğinde öğretmenler en fazla **günlük yaşamla bağlantı** (f=7), **yakın çevreyle ilişki** (f=5), **kişisel deneyimle ilişkilendirme** (f=4) ve **yaşam boyu öğrenmeye katkı** (f=4) kodlarına vurguda bulunmuşlardır.

"Genel olarak günlük hayattan örnekler verilmeye çalışılmış, hakkını yiyemem ama bazen de çok zorlama olmuş gibi hissediyorum. ..." (Ö₄)

"Kitaptaki etkinliklerde kantinden simit alma, tabaktaki elmaları kardeşine paylaşırma ya da oyuncaklarını grupta gibi tam onların her gün yaşadığı örnekler var." (Ö₉)

"... Bazen kitaptaki kurgu çocuğun hiç yaşamadığı bir tatil anısı olabiliyor, o zaman çocuk o olayla kişisel bir bağ kuramayıp sadece işlemi yapıp geçiyor." (Ö₁₀)

Beşinci soru bağlamında, öğretmenlerin "Etkinliklerin Sınıf Ortamında Uygulanabilirliği" ana teması üç alt tema ve kırk sekiz kod altında gruplandırılmıştır.

Tablo 6. Etkinliklerin Sınıf Ortamında Uygulanabilirliği

Alt Temalar	Kodlar	Katılımcı	f
Uygulama kolaylığı	Öğrencilerin etkinliği uygulayabilmesi	Ö ₁ , Ö ₂ , Ö ₃ , Ö ₆ , Ö ₈ , Ö ₉ , Ö ₁₀ , Ö ₁₁ , Ö ₁₂	9
	Öğretmen açısından uygulanabilirliği	Ö ₁ , Ö ₄ , Ö ₅ , Ö ₆ , Ö ₈ , Ö ₉ , Ö ₁₂	7
	Sınıf ortamında uygulanabilirliği	Ö ₂ , Ö ₄ , Ö ₅ , Ö ₇ , Ö ₁₀ , Ö ₁₁	6
Zaman Yönetimi	Ders süresine uygunluğu	Ö ₁ , Ö ₂ , Ö ₃ , Ö ₅ , Ö ₇ , Ö ₉ , Ö ₁₂	7
	Planlanan sürede tamamlanabilmesi	Ö ₂ , Ö ₅ , Ö ₆ , Ö ₈ , Ö ₉	5
	Zamanın verimli kullanımı	Ö ₃ , Ö ₄ , Ö ₅ , Ö ₇ , Ö ₁₂	5
Materyal Yeterliliği	Gerekli materyallerin sağlanabilirliği	Ö ₁ , Ö ₅ , Ö ₆ , Ö ₉ , Ö ₁₁ , Ö ₁₂	6
	Dijital araçlara erişim	Ö ₄ , Ö ₅ , Ö ₁₀	3
Toplam			48

Birinci sınıf matematik ders kitabındaki etkinliklerin sınıf ortamında uygulanabilirliği temasında öğretmenler uygulama kolaylığı alt temasına (f=22), zaman yönetimi alt temasına (f=17) ve materyal yeterliliği alt temasına (f=9) vurguda bulunmuşlardır.

“Sınıf mevcudu kalabalıklaştıkça kitabın öğretmen açısından uygulanabilirliği maalesef epey düşüyor.” (Ö₁₁)

“Öğretmen olarak beni hiç yormadan, ekstra bir pedagojik takla atmama gerek kalmadan sınıfı çok rahat yönlendirebiliyorum. Uygulaması gerçekten çok pratik.” (Ö₉)

“Aslında bazı çıktılarıdaki etkinlikler ders saati hesaba katılarak çok kararında hazırlanmış. Ne çocuğu çok sıkacak kadar uzun, ne de boşluk yaratacak kadar kısa.” (Ö₃)

“Kitaptaki etkinliklerin en sevdiğim yanlarından biri, genellikle sınıfta veya çocuğun çantasında zaten var olan malzemeleri istemesi.” (Ö₆)

“Kitaptaki bazı uzun soluklu etkinliklerde, çocukların koptuğunu görüyorum.” (Ö₁₀)

SONUÇ VE TARTIŞMA

Bu araştırmada, sınıf öğretmenlerinin güncellenen birinci sınıf matematik ders kitabı etkinliklerine yönelik görüşleri; öğretim programına uygunluk, içeriğin düzenlenişi, öğrenme ilkeleri, gerçek yaşamla ilişkilendirme ve sınıf içi uygulanabilirlik boyutlarında derinlemesine incelenmiştir. Elde edilen bulgular, ders kitabının büyük oranda matematik öğretim programındaki öğrenme çıktılarıyla doğrudan örtüştüğünü göstermektedir. Katılımcıların çoğunluğu, konu sıralamasının programla paralel ilerlediğini ve beceri temelli yapının desteklendiğini ifade etmiştir.

Araştırmanın “Öğretmen ve Öğrenci Etkileşim” ile “Planlama ve Yapısal Boyut” alt temalarına ilişkin sonuçları incelendiğinde, birinci sınıf matematik ders kitabı etkinliklerinin pedagojik tasarım ve süreç yönetimi açısından önemli dinamiklere sahip olduğu görülmüştür. Araştırmada elde edilen sonuçlardan biri, ders kitaplarındaki oyunlaştırma unsurlarının ve eğitsel tasarım kalitesinin öğretmenler tarafından güçlü bir şekilde vurgulanmış olmasıdır. Bu durum, yeni program doğrultusunda hazırlanan materyallerin, birinci sınıf öğrencilerinin en temel ihtiyacı olan oyun yoluyla öğrenme ve merak duygusunu tetikleme işlevini başarıyla yerine getirdiğini, dolayısıyla matematiğe karşı olumlu tutum geliştirmeyi desteklediğini ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, etkinliklerin uygulanma sürecinde öğretmen rehberliğine duyulan ihtiyacın yüksek olması, buna karşın bağımsız öğrenmeyi destekleme boyutunun daha geride kalması, birinci sınıf kademesinin gelişimsel özellikleriyle (okuma-yazma becerisinin henüz kazanılmamış olması) doğrudan ilişkilendirilebilir. Sonuç olarak; incelenen ders kitaplarının farklı öğrenme düzey ve stillerine uyum sağlayabilen esnek ve yapısal çeşitliliğe sahip bir tasarımla hazırlandığı; ancak öğrencilerin kendi başlarına da yürütebilecekleri, görsel yönlendirmesi yüksek bağımsız etkinlik modellerine kitaplarda daha fazla yer verilmesinin sınıf içi süreç kalitesini ve öğrenci özerkliğini daha da artıracığı söylenebilir.

Araştırma sonucunda, sınıf öğretmenlerinin birinci sınıf matematik ders kitabı etkinliklerini öğrenme ilkelerine uygunluk ve dil/anlama seviyesi açısından genel olarak olumlu değerlendirdikleri görülmüştür. Öğretmen görüşlerinde öne çıkan en güçlü yönler; etkinliklerin güncel eğitim yaklaşımlarına uygun olması ve öğrencinin merkezde tutulmasıdır. Bunun yanı sıra, henüz okuma-yazma becerisinin başında olan birinci sınıf öğrencileri için hayati önem taşıyan açıklık, anlaşılabilirlik ve yaş/gelişim düzeyine uygunluk ilkelerinin ders kitaplarında yüksek düzeyde karşılık bulduğu tespit edilmiştir. Buna karşın, ilkökul matematiğinin temelini oluşturan somuttan soyuta ve özellikle öğrencinin kendi yaşantısından yola çıkmasını sağlayan yakından uzağa ilkelerine yönelik öğretmen vurgusunun daha düşük kalması dikkat çekicidir. Sonuç olarak, yeni müfredat doğrultusunda hazırlanan matematik ders kitaplarının dil, anlaşılabilirlik ve güncellik standartlarını yakaladığı; ancak öğrencilerin somut deneyimlerini ve yakın çevre ilişkilerini matematiksel kavramlarla ilişkilendiren (bağlamsal) etkinliklerin nitelik ve nicelik yönünden daha da zenginleştirilmesi gerektiği söylenebilir.

Araştırma kapsamında sınıf öğretmenlerinin “Yaşamla İlişkilendirme” alt temasına yönelik görüşleri incelendiğinde, birinci sınıf matematik ders kitabı etkinliklerinin öğrencilerin somut dünyası ile matematiksel kavramlar arasında anlamlı köprüler kurduğu sonucuna ulaşılmıştır. Öğretmenler tarafından en yoğun vurgulanan boyutların günlük yaşamla bağlantı ve yakın çevreyle ilişki olması, ders kitaplarının Türkiye Yüzyılı Maarif Modeli'nin temel amaçlarından biri olan 'bilgiyi işlevsel kılma ve bağlamlaştırma' hedefini büyük ölçüde yakaladığını göstermektedir. Etkinliklerin öğrencilerin sınırlı kişisel deneyimlerine hitap edecek esneklikte tasarlanmış olması ve öğretmenler tarafından yaşam boyu öğrenme becerilerine katkı sunar nitelikte bulunması, erken çocukluk dönemindeki matematik öğretiminin kalıcılığı açısından kritik bir kazanımdır. Sonuç olarak; incelenen ders kitabı etkinliklerinin, matematiği soyut ve kopuk bir ders olmaktan çıkarıp, öğrencinin yakın çevresinde ve günlük rutinlerinde deneyimleyebileceği yaşayan bir araç haline getirmede başarılı olduğu; bu durumun birinci sınıf öğrencilerinin matematik okuryazarlığı becerilerinin temelini güçlendirdiği söylenebilir.

Araştırmanın birinci sınıf matematik ders kitabı etkinliklerinin “Uygulama Kolaylığı”, “Zaman Yönetimi” ve “Materyal Yeterliliği” alt temasına ilişkin sonuçları incelendiğinde bütüncül ama iki kutuplu bir öğretmen algısı tespit edilmiştir. Zaman yönetimi ve sınıf ortamına uygunluk boyutlarında yaşanan olumsuz deneyimler, süreç odaklı ve yoğun materyal gerektiren etkinliklerin ders süresi ile kalabalık sınıf gerçekleri arasında bir sıkışma yaşadığına işaret etmektedir. Bu bulgu, birinci sınıf düzeyindeki öğrencilerin gelişimsel özellikleri ve sınıf içi dinamikleri gözetilerek gerçekçi bir tasarım yapılmadığını ortaya koymaktadır. Diğer taraftan, etkinliklerin gerektirdiği materyallerin kolay sağlanabilir olması sınıftaki uygulanabilirliği artırırken; dijital araçlara erişim boyutunun daha az vurgulanması ders kitaplarının teknolojik altyapıdan bağımsız olarak da sahada esnek bir biçimde yürütülebildiğine işaret etmektedir. Sonuç olarak, yeni matematik ders kitaplarının farklı sosyo-ekonomik ve fiziksel şartlara sahip sınıflara uyarlanabilecek esnek ve değiştirilebilir alternatif yönergeler barındırması bir gereklilik olarak ortaya çıkmaktadır.

Öneriler

Bu araştırmadan elde edilen bulgular ve sonuçlar doğrultusunda, Türkiye Yüzyılı Maarif Modeli çerçevesinde hazırlanan birinci sınıf matematik ders kitabı etkinliklerinin niteliğini

artırmak ve sınıf içi uygulama sürecini daha etkili kılmak amacıyla uygulayıcılara, program geliştiricilere ve araştırmacılara yönelik şu öneriler sunulabilir:

- Öğrencilerin henüz okuma-yazma bilmediği gözetilerek, öğretmen rehberliği ihtiyacını azaltacak ve bağımsız çalışmayı destekleyecek görsel yönlendirmeli (piktogram, sembol vb.) etkinlik tasarımlarına daha fazla yer verilebilir.
- Süreç odaklı etkinliklerin kalabalık sınıflarda yol açtığı zaman yönetimi sorunlarını aşmak adına, kitaplara farklı sınıf mevcutlarına ve sosyo-ekonomik şartlara uyarlanabilir esnek/alternatif yönergeler eklenebilir.
- Öğrencilerin materyal gerektiren ve süreç odaklı olan bu etkinliklerin ders süresine sığdırılabilmesi için öğretmenlerin ders öncesi materyal ve organizasyon planlamasını (zümre iş birliğiyle) önceden yapması desteklenebilir.
- Öğretmen görüşleriyle sınırlı olan bu çalışma; gelecek araştırmalarda sınıf içi doğrudan gözlemlerle, boylamsal desenlerle veya video analizleriyle desteklenebilir.
- Kitapların sahadaki esnekliğini ölçmek adına, farklı sosyo-ekonomik düzeylerdeki okullar (örneğin kalabalık kent okulları ile kırsal bölgeler) arasında karşılaştırmalı çalışmalar yapılabilir.
- Müfredatın kalıcılığı açısından kritik rol oynayan velilerin evdeki sürece katılımı ve birinci sınıf öğrencilerinin ders kitabı etkinliklerine yönelik algıları nitel araştırma yöntemleriyle incelenebilir.

KAYNAKÇA

- Creswell, J. W. (2017). *Eğitim araştırmaları: nicel ve nitel araştırmanın planlanması, yürütülmesi ve değerlendirilmesi*. İstanbul: Edam.
- Demirel, Ö. ve Kiroğlu, K. (2021). *Eğitim ve ders kitapları*. Ö. Demirel ve K. Kiroğlu (Ed.), Ders kitabı incelemesi (5. b.) içinde (s. 1-12). Ankara: Pegem Akademi
- Gueudet, G., Pepin, B., Restrepo, A., Sabra, H., ve Trouche, L. (2018). E-textbooks and connectivity: proposing an analytical framework. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 16(3), 539-558.
- Güzel, D. ve Şimşek, A. (2014). Milli eğitim şûralarında ders kitapları. *Sakarya Üniversitesi Eğitim Fakültesi Dergisi*, 23(23), 172-216.
- Kaya, A. ve Azar, A. (2010). İlköğretim 4. ve 5. sınıf matematik ders kitaplarındaki etkinliklere ilişkin öğretmen görüşleri. *Milli Eğitim Dergisi*, 40(187), 269-292.
- Kılıçoğlu, E. (2020). Ortaokul matematik ders kitabı etkinliklerinde soyutlama becerisinin incelenmesi. *Mersin Üniversitesi Eğitim Fakültesi Dergisi*, 16(3), 628-650.
- Memiş, M. (2024). *Türkçe ders kitabı inceleme kılavuzu*. Ankara: Nobel Yayınları.
- Miles, M. B. and Huberman, A. M. (2016). *Genişletilmiş Bir Kaynak Kitap: Nitel Veri Analizi* (S. Akbabaaltun ve A. Ersoy, Çev. Ed.) Ankara: Pegem Akademi.
- Remillard, J. T. (2011). Modes of engagement: Understanding teachers' transactions with mathematics curriculum resources. In G. Gueudet, B. Pepin, & L. Trouche (Eds.), *From text to 'lived' resources: Mathematics curriculum materials and teacher development* (105-122). Springer.

- Şahin, A. (2008). İlköğretim birinci sınıf Türkçe ders kitabı, öğrenci çalışma kitabı ve öğretmen kılavuz kitabının öğretmen görüşlerine dayalı olarak değerlendirilmesi. *Ahi Evran Üniversitesi Kırşehir Eğitim Fakültesi Dergisi*, 9(3), 133-146.
- Yıldırım, A. ve Şimşek, H. (2006). Sosyal bilimlerde nitel araştırma yöntemleri, (5. Baskı), Ankara: Seçkin Yayıncılık.

Ab Ülkelerinin İhracat Performansının Rca Açısından İncelenmesi ²

Kenfack Tsueti JOSEPH VALDAİS

kenfackvaldais1000success@gmail.com; Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü , Uluslararası Ticaret ve Lojistik Ana Bilim Dalı, Çanakkale / Türkiye.

Özet

Bu çalışmanın amacı, AB ülkelerinin ihracatından hareketle Açıklanmış Karşılaştırmalı Üstünlükler (RCA) indeksini kullanarak en yüksek RCA değerine sahip ülkelerin belirlenmesidir. RCA değeri, ihracat verilerinden yola çıkarak seçilen ülkeler ve belirlenen ürünler için ülkeler arasında rekabet üstünlüğünü ortaya çıkarmada kullanılabilir. Buna göre, ilgili ülke grubuna yönelik 1995-2024 dönem verileri dikkate alınarak hesaplamalar yapılmıştır. Veriler UNCTAD veri tabanından elde edilmiştir. Bu doğrultuda en yüksek RCA değerine ulaşan ülkeler sırasıyla Portekiz ve Letonya olmuştur. Ortalama değerlere bakıldığında ise aynı şekilde ilk sırada 172,7 değeri ile Portekiz ikinci sırada ise 80,7 değer ile Letonya gelmektedir. Sıralamada en düşük değerlerin ise Almanya, İtalya ve İsveç'e ait olduğu görülmektedir.

Anahtar Kelimeler: AB Ülkeleri , Dış Ticaret , RCA

Abstract

The aim of this study is to identify the countries with the highest Revealed Comparative Advantage (RCA) values using export data from EU countries. The RCA value can be used to reveal the competitive advantage between countries for selected countries and specific products, based on export data. Accordingly, calculations were made considering data from 1995-2024 for the relevant country group. The data was obtained from the UNCTAD database. In this context, the countries with the highest RCA values were Portugal and Latvia, respectively. Looking at the average values, Portugal ranked first with a value of 172.7, followed by Latvia with 80.7. The lowest values were observed in Germany, Italy, and Sweden .

Keywords: EU Countries, Foreign Trade, RCA.

² Bu çalışma Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Uluslararası Ticaret ve Lojistik Anabilim Dalında Dr. Öğr. Üyesi Muhammet KARANFİL'in tez danışmanlığında hazırlanan "AB Ülkelerinin İhracat Performansının Lojistik Performansına Etkisinin İncelenmesi" adlı Yüksek Lisans tezinden türetilmiştir.

GİRİŞ

Avrupa Birliği ülkelerinde dış ticaretin gelişimi ve lojistik altyapının yenilenmesi ve ekonomik entegrasyonun güçlendirilmesi küresel rekabet gücünün artmasında önemli bir rol oynamaktadır. İhracata dayalı büyüme stratejileri dahilinde ülkelerin uluslararası pazarlarda hangi alanlarda uzmanlaştıklarını belirlemesi ekonomik performans için önemlidir. Bu çerçevede ülkelerin hangi sektörlerde rekabet avantajına sahip olduğunu analiz etmek amacıyla Açıklanmış Karşılaştırmalı Üstünlükler (RCA) endeksi sıkça kullanılmaktadır. AB ülkelerinin ihracat performansını RCA ile incelemek için 1995-2024 dönemine ait veriler kullanılarak hesaplamalar yapılmıştır. Analizin sonuçları Avrupa Birliği ülkeleri arasında sektörel uzmanlaşma ve rekabet gücü yönünden önemli farklılıklar bulunduğunu gösterir. Özellikle yüksek teknoloji ve otomotiv ve kimya ve makine sanayi gibi alanlarda bazı ülkeler güçlü karşılaştırmalı üstünlüklere sahipken diğer ülkelerde uzmanlaşma seviyeleri daha düşüktür. Avrupa Birliği'nin ortak ticaret politikaları ve gümrük birliği uygulamaları ve lojistik ağları geliştiği için birçok ülkede ihracat performansı zamanla daha stabil bir yapıya ulaşmaktadır. Son yıllarda dijitalleşme ve yenilikçilik ve sürdürülebilir üretim politikalarının da RCA değerleri üzerinde etkili olduğu düşünülmektedir.

YÖNTEM

B. Balassa'nın indeksi ile ölçülen ortaya çıkarılmış karşılaştırmalı üstünlük kavramı, bir ülkenin zayıf ve güçlü sektörlerini belirlemek için pratikte yaygın olarak kullanılabilir. Balassa indeksi, bir ülkenin ilgili mal ya da sektördeki toplam ihracatındaki payının, o mal ya da sektördeki dünyanın (ya da dikkate alınan ülke grubunun) toplam ihracatındaki payına oranını vermektedir. Kısaca bu kavram bir ülkenin bir mal ya da sektördeki yurt içi uzmanlaşmasını, dünyanın uzmanlaşması ile ilişkilendirmektedir. Yapılan hesaplama ile bir ülkenin belli bir üründe karşılaştırmalı üstünlüğe ait rekabet düzeyi ölçülmektedir (Karanfil ve Topçu: 2024).

Hesaplama şu şekilde yapılmaktadır;

$$RCA_{ik} = (X_{ik} / X_i) / (X_k / X)$$

i= ülkedir, k: üründür ve

X_{ik} : i ülkesinin k ürünü ihracatı

X_i : i ülkesinin toplam ihracatı

X_k : k ürünü dünya toplam ihracatı

X : dünya toplam ihracatını verir.

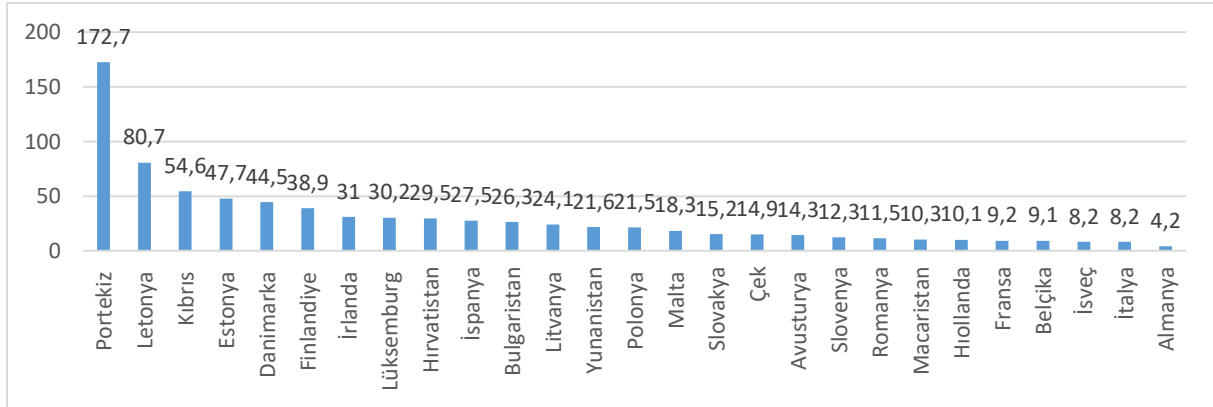
Bu hesaplama göre, ülkenin rekabet gücü ve de uzmanlaşma seviyesi belirlenmektedir. Burada dikkat, ülkeler arasında fırsat maliyetlerinin farklı olmasından hareketle ülkelerin uzmanlaşma durumlarıdır. Değer 1’den büyük çıkarsa o üründe ülke uzmanlaşmış ya da rekabet gücüne sahiptir. 1’den küçük çıkarsa ülkenin o üründe rekabet gücü yoktur sonucu ortaya çıkmaktadır (Balassa, 1977; Karanfil ve Topçu: 2024).

Çalışmada indeks hesaplamasında kullanılan veriler UN Comtrade veri tabanından alınmıştır. Verilerle ilk olarak ülkelerin ihracat değerlerine yönelik ortalama RCA değerleri verilmiştir. Bu değerler bütün ürün gruplarındaki ülkenin almış olduğu en yüksek RCA değerlerinin ortalamasıdır.

BULGULAR

Şekil 1 de AB ülkelerinin ortalama değerleri gösterilmektedir. Bu değerler 1995-2024 arasında en yüksek RCA değerlerinden hareketle hesaplanmıştır.

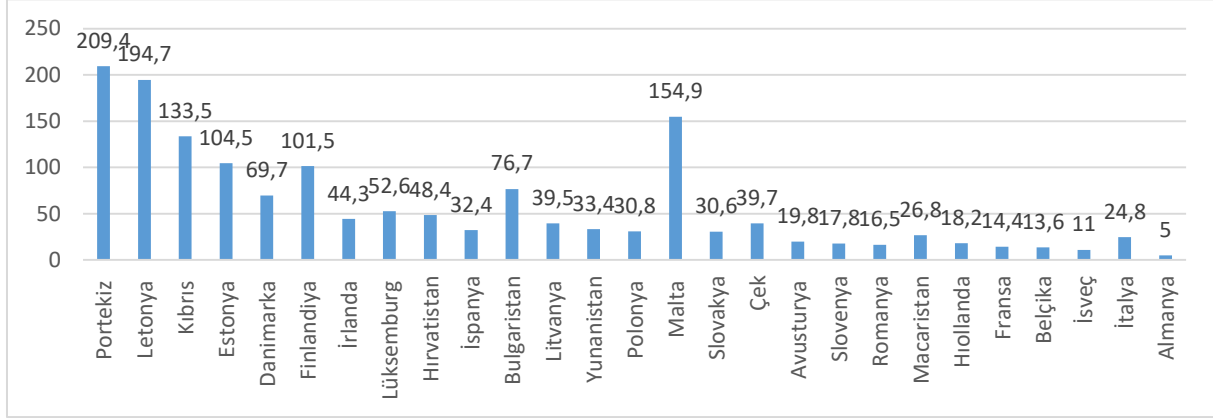
Şekil 1. AB ülkelerinin ortalama RCA’sı (1995-2024)



Kaynakça : UNCTAD

Yukarıdaki grafiğe göre, Portekiz 172,7 ile en yüksek ortalama RCA değerine sahip olup listenin başında yer almaktadır; onu 80,7 ile ikinci en yüksek ortalama RCA değerine sahip Letonya izlemektedir. Listenin alt sıralarında ise, en düşük ortalama RCA değerine sahip ülke 4,2 ile Almanya, ikinci en düşük değere sahip ülke ise 8,2 ile İtalya'dır.

Şekil 2. AB ülkelerinin en yüksek RCA'sı yıl 1995-2024



Kaynakça: UNCTAD

Yukarıdaki grafiğe bakıldığında, yıllar dikkate alındığında, 2012 yılında Portekiz 209,4 ile en yüksek RCA değerine sahiptir; ikinci sırada ise 1998 yılında 194,7 RCA puanıyla Letonya yer almıştır. Bu ülkelerin ardından Malta, Kıbrıs ve Finlandiya gelmektedir. Birleşmiş Milletler Ticaret ve Kalkınma Konferansı veri tabanında tüm ürünlere yönelik AB ülkelerinin en yüksek RCA değerleri alınmıştır. Bu veriler incelenerek hangi ülkelerin hangi yılda en yüksek değere ulaştığı ve ortalama değerleri ne kadardır soruları cevaplanarak ülkeler arasındaki dış ticaret rekabet düzeyleri arasındaki farklılıklar ortaya çıkarılmıştır. Kısaca elde edilen bulgulara bakıldığında AB içinde en rekabetçi ülkelerin Portekiz ve Letonya olduğu görülmüştür. Portekiz imalat ürünlerinde, Letonya ise yenilebilir olmayan ham maddeler alanında lider konumdadır. Rekabet düzeyi en düşük ülkelerin ise Almanya, İtalya ve İsveç olduğu görülmüştür.

SONUÇ VE TARTIŞMA

Genel olarak değerlendirildiğinde, Avrupa Birliği ülkelerinde bütün ürün grupları için en yüksek RCA değerleri belirlenmiştir. Özellikle yüksek teknoloji üretimi yapan ve etkin lojistik altyapıya sahip ülkeler, küresel ticarete daha yüksek rekabet gücü elde etmektedir. AB ülkelerine bakıldığında en rekabetçi ülkelerin Portekiz ve Letonya olduğu görülmektedir. Portekiz en yüksek RCA oranına 2012 yılında, Letonya ise 1998 yılında ulaşmıştır. Ürün grubu olarak Portekiz imalat ürünlerinde daha uzmanlaşırken, Letonya ise yenilebilir olmayan ham maddeler alanında ön plana çıkmaktadır. Ülkeler arasında Almanya, İtalya ve İsveç ise RCA oranı en düşük ülkelerdir.

KAYNAKÇA

- Balassa, B. (1977). Revealed comparative advantage revisited: An analysis of relative export shares of the industrial countries, 1953–1971. *The Manchester School*, 45(4), 327–344.
- Karanfil, M. ve Topçu, D. (2024). Türkiye’nin Zeytinyağı İhracatının Dış Ticaretteki Rekabet Gücünün Değerlendirilmesi. Ege 12. Uluslararası Sosyal Bilimler Kongresi, 26-30 Aralık 2024, 3125-3133.
- UNCTAD. (2026). *Birleşmiş Milletler Ticaret ve Kalkınma Konferansı* Erişim adresi: <https://unctadstat.unctad.org/EN/RcaRadar.html> (Erişim Tarihi: 10.03.2026)

FEN VE MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ

Kuraklık Stresinin Tıbbi Bitkilerde Oluşturduğu Etkiler ve Savunma Mekanizmaları

Uğur TAN¹, Hatice Kübra GÖREN¹

ORCID ID: 0000-0002-9592-2790, 0000-0001-7654-1450

¹Aydın Adnan Menderes Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarla Bitkileri Bölümü, Aydın, TÜRKİYE

Özet

Günümüzde artan sıcaklıklar ve düzensiz yağış rejimleri, kuraklık şiddetini artırarak bitkilerde su potansiyeli kaybı, stomatal kapanma ve oksidatif stres gibi temel fizyolojik bozulmalara yol açmaktadır. Bu durum yalnızca bitki büyümesi ve verimini değil, aynı zamanda farmakolojik açıdan önemli olan sekonder metabolitlerin sentezini ve kalitesini de doğrudan etkilemektedir. Kuraklığa karşı geliştirilen adaptasyon stratejileri; morfolojik, fizyolojik ve biyokimyasal düzeylerde gerçekleşmektedir. Morfolojik adaptasyonlar arasında derin ve yaygın kök sistemleri ile suya erişimin artırılması, yaprak yüzeyinin küçülmesi ve kutikula kalınlaşmasıyla su kaybının azaltılması öne çıkmaktadır. Fizyolojik mekanizmalar ise stomatal kontrol, su kullanım verimliliğinin artırılması, ozmotik ayarlama ve abscisik asit (ABA) aracılı düzenlemeleri içermektedir. Biyokimyasal düzeyde ise antioksidan enzim sistemlerinin güçlenmesi ve fenolikler, flavonoidler ile uçucu yağlar gibi sekonder metabolitlerin artışı, bitkilerin stres koşullarına dayanıklılığını artırmaktadır. Kekik, adaçayı, lavanta ve çörek otu gibi türler, kuraklığa dayanıklılık açısından öne çıkan tıbbi bitkiler arasında yer almakta olup, bu türlerde gözlenen adaptasyon mekanizmaları sürdürülebilir üretim açısından önemli ipuçları sunmaktadır. Sonuç olarak, kuraklık stresinin kontrollü yönetimi, hem bitki dayanıklılığını artırmakta hem de etkin madde üretimini optimize edebilmektedir. Bu bağlamda, kuraklığa toleransın genetik ve biyokimyasal temellerinin daha ayrıntılı araştırılması, iklim değişikliği koşullarında tıbbi bitki üretiminin sürdürülebilirliği açısından kritik öneme sahiptir.

Anahtar Kelimeler: Kuraklık stresi, Tıbbi bitkiler, Adaptasyon mekanizmaları, Sekonder metabolitler, Antioksidan sistemler

Effects of Drought Stress on Medicinal Plants and Their Defense Mechanisms

Abstract

Increasing temperatures and irregular precipitation regimes intensify drought conditions, leading to major physiological disturbances in plants such as reduced water potential, stomatal closure, and increased oxidative stress. These changes not only limit plant growth and yield but also directly affect the synthesis and quality of pharmacologically important secondary metabolites. Adaptation strategies developed by plants under drought conditions occur at morphological, physiological, and biochemical levels. Morphological adaptations include enhanced water access through deep and extensive root systems, as well as reduced water loss via smaller leaf surfaces and thicker cuticles. Physiological

mechanisms involve stomatal regulation, improved water use efficiency, osmotic adjustment, and abscisic acid (ABA)-mediated responses. At the biochemical level, strengthened antioxidant enzyme systems and increased production of secondary metabolites such as phenolics, flavonoids, and essential oils contribute to stress tolerance. Medicinal plants such as thyme, sage, lavender, and black cumin are notable for their drought resistance, and their adaptive responses provide valuable insights for sustainable production. In conclusion, controlled management of drought stress can enhance plant resilience while optimizing the production of bioactive compounds. Further investigation into the genetic and biochemical basis of drought tolerance is crucial for ensuring the sustainability of medicinal plant production under climate change conditions.

Keywords: Drought stress, Medicinal plants, Adaptation mechanisms, Secondary metabolites, Antioxidant systems

Giriş

Kuraklık, tıbbi ve aromatik bitkilerde primer büyüme süreçleri ile sekonder metabolit üretimini aynı anda etkilediği için tarla bitkilerindeki klasik “verim” yaklaşımından daha karmaşık bir biyolojik ve agronomik sorun oluşturur. Bu grupta amaç yalnızca biyokütleyi korumak değil, terapötik kaliteyi belirleyen etken maddelerin miktar ve kompozisyonunu da yönetmektir (Bistgani ve ark., 2024). Güncel sentez çalışmaları, su açığının solunum, fotosentez, stomatal iletkenlik, karbon asimilasyonu ve antioksidan denge üzerinde belirgin baskı oluşturduğunu; 27 çalışmayı kapsayan meta-analizde ise enzimatik antioksidanlar, nispi su içeriği ve verimin en tutarlı kuraklık göstergeleri olduğunu ortaya koymuştur. Aynı meta-analiz, klorofil içeriğinin tek başına her tür ve her deney sistemi için güvenilir bir karar değişkeni olmadığını da vurgulamaktadır (Bistgani ve ark., 2024; Tan ve Gören, 2024).

Bu çerçeve, Akdeniz kuşağında daha da önem kazanmaktadır. IPCC değerlendirmeleri, Akdeniz bölgesinde su mevcudiyetinin halihazırda baskı altında olduğunu ve insan kaynaklı iklim değişikliğinin kuraklık şiddetini artırdığını belirtmektedir. Türkiye literatürü de kuraklığın bitki fizyolojisi, genetik kaynakların korunması ve tolerans mekanizmalarının açıklanması bakımından merkezi bir araştırma alanı olduğuna dikkat çekmektedir (IPCC, 2023; Örs ve Ekinci, 2015). Tıbbi bitkilerde kuraklığın en dikkat çekici yönü, kalite-verim ilişkisinin doğrusal olmamasıdır. Hafif ya da orta şiddette stres, bazı türlerde aktif bileşiklerin konsantrasyonunu yükseltebilir; ancak şiddetli ve uzun süreli kuraklık çoğu durumda toplam biyokütleyi, drog verimini veya toplam yağ verimini düşürür. Bu nedenle kuraklık, tıbbi bitkilerde “zarar” ve “uyarılmış kalite artışı” arasında gidip gelen çift yönlü bir süreç olarak değerlendirilmelidir (Tan ve Gören, 2024; Bistgani ve ark., 2024).

Kuraklığın Tıbbi Bitkilerdeki Etkileri

Kuraklığın ilk etkisi su durumunda bozulma ve buna bağlı fizyolojik baskıdır. *Artemisia annua*’da büyüme, biyokütle birikimi, nispi su içeriği ve klorofil azalırken; yaprak su potansiyeli daha negatif değerlere kaymış, prolin, protein ve lipid peroksidasyonu artmıştır (Soni ve Abdin, 2017; Aslani ve ark., 2023; Şahin ve Torun, 2024). *Salvia officinalis*’te kuraklık şiddeti yükseldikçe büyüme parametreleri, nispi su içeriği, klorofil indeksi, mineral beslenme ve uçucu yağ verimi düşmüştür. Türkçe bir güncel çalışmada *Malva sylvestris*’te 21 günlük kuraklık uygulaması büyümeyi, nispi su içeriğini ve osmotik potansiyeli azaltmış; H₂O₂, lipid peroksidasyonu ve antioksidan enzim aktivitelerini artırmıştır. Bu örnekler, su kıtlığının önce hidrolik ve fotosentetik sistemi, ardından tüm metabolik dengeyi zorladığını göstermektedir (Soni ve Abdin, 2017; Aslani ve ark., 2023; Şahin ve Torun, 2024). İkinci ana sonuç oksidatif strestir. *Silybum marianum*’da kuraklıkla birlikte klorofil, askorbik asit ve glutatyon azalırken H₂O₂, MDA, prolin ve SOD, CAT, APX, POD, GR gibi enzim aktiviteleri artmıştır. Tatlı fesleğende

(*Ocimum basilicum*) kademeli kuraklık altında yapraklarda solma ve koyulaşma gözlenmiş; MDA, H₂O₂ ve prolin birikimi ile antioksidan sistemde yeniden düzenleme meydana gelmiştir. Dolayısıyla kuraklık, bir yandan zararlı ROS yükünü artırırken öte yandan savunma sistemini yukarı regüle eden bir “oksidatif yeniden programlama” durumu yaratır (ElSayed ve ark., 2019; Zhou ve ark., 2025).

Bununla birlikte tıbbi bitkiler açısından en kritik mesele, sekonder metabolitlerin stres altında nasıl değiştiğidir. Bu yanıt tür-spesifik ve doz-bağımlıdır. Biberiyede (*Salvia rosmarinus*) toplam monoterpen yüzdesi azalırken seskiterpen, diterpen ve triterpen fraksiyonları artmıştır. Fesleğende bir kültüvarda şiddetli kuraklık (%50 tarla kapasitesi), metilkavikol ve metileugenol birikimini artırmış; bu artış CVOMT ve EOMT ekspresyonundaki yükselme ile ilişkili bulunmuştur. *Glycyrrhiza uralensis*'te ise kuraklık özellikle yeraltı organlarında glisirizik asit, glisirretinik asit ve çok sayıda flavonoidin birikimini uyarmıştır. Benzer biçimde *Thymus* türlerinde kuraklık terpenleri genellikle azaltırken, orta doz yapraktan ABA uygulaması timol ve karvakrol gibi farmasötik açıdan önemli fenolik monoterpenleri artırabilmiştir. Bu nedenle tıbbi bitkilerde “kuraklık etkisi”, yalnızca stres hasarı değil, aynı zamanda kalite bileşenlerinde yeniden dağılım olarak okunmalıdır (Mandoulakani ve ark., 2017; Darwish ve ark., 2026; Yao ve ark., 2022; Alipour ve ark., 2025).

Tür	Temel fizyolojik/fitokimyasal etki	Yön	Kaynak
<i>Malva sylvestris</i>	Büyüme, nispi su içeriği ve osmotik potansiyel azalır; H ₂ O ₂ , lipid peroksidasyonu ve SOD/POX/CAT/APX/GR artar	Karma: büyüme ↓, savunma ↑	Şahin ve Torun, 2024
<i>Artemisia annua</i>	Biyokütle, RWC ve klorofil azalır; prolin, protein, TBARS ve antioksidan enzimler artar; artemisinin genel olarak azalır	Büyüme ↓, osmoproteksiyon/antioksidan ↑	Soni ve Abdin, 2017
<i>Salvia officinalis</i>	Kuraklık arttıkça büyüme, RWC, klorofil indeksi, besin alımı ve uçucu yağ verimi azalır	Çoğunlukla ↓	Aslani ve ark., 2023
<i>Salvia rosmarinus</i>	Toplam klorofil azalır; CAT, SOD, PPO, SPO artar; APX ve PAL azalır; monoterpenler düşerken daha ağır terpen sınıfları artar	Fizyolojik hasar + metabolik kayma	Darwish ve ark., 2026
<i>Ocimum basilicum</i>	MDA, H ₂ O ₂ , prolin ve antioksidan yanıt artar; ana VOC'ler görece stabildir; flavonoid, flavonol, lignin ve α-linolenik asit yükselir	Savunma ve kalite bileşenleri ↑	Zhou ve ark., 2025
<i>Silybum marianum</i>	Klorofil, AsA ve GSH azalır; H ₂ O ₂ , MDA, prolin ve antioksidan enzimler artar;	Hasar + telafi + kalite artışı	ElSayed ve ark., 2019

Savunma Mekanizmaları

Kuraklığa karşı savunma, önce fizyolojik ve morfolojik düzeyde başlar. Stomatal kapanma, transpirasyonun sınırlandırılması, su kullanım etkinliğinin artırılması ve ozmotik ayarlama bunun çekirdeğini oluşturur. Morfolojik olarak yaprak alanının küçülmesi, gövde ve sürgün büyümesinin baskılanması, kök/sürgün tahsisinin değişmesi ve fenolojik yeniden ayarlama sık gözlenir. *Melissa officinalis*'te LED ile ön-koşullandırma, kuraklık altında RWC, çözünür şeker, prolin, ABA ve

rosmarinik asidi artırmış; RBOH, NCED ve RAS genlerini yukarı, ABA8Ox'u aşağı regüle etmiştir. Bu sonuç, fizyolojik uyumun hormon metabolizması ve redoks sinyaliyle bütünleştiğini açık biçimde göstermektedir (Ahmadi ve ark., 2019; Örs ve Ekinci, 2015).

Biyokimyasal savunma, kuraklık toleransının en iyi belgelenmiş katmanıdır. Prolin ve çözünür şekerler osmotik tampon görevi görür; SOD, CAT, APX, POD, GR, DHAR ve peroksiredoksinler ROS temizliğini sağlar; fenoller, flavonoidler, lignin ve bazı uçucu yağ bileşenleri hem antioksidan hem de koruyucu işlev üstlenir. *S. marianum*'da antioksidan enzimlere ait transkript ve enzim aktiviteleri artarken chalcone synthase gen ailesi de aktive olmuş; *A. annua*'da prolin biyosentez genleri indüklenmiş, katabolik genler baskılanmıştır. Tatlı fesleğende fenilpropanoid/flavonoid ve lipid metabolizması, kuraklığa yanıt veren ana metabolik eksenler olarak öne çıkmıştır. *Thymus vulgaris*'te endofit + FeNP kombinasyonları ise PAL/PPO aktivitesini, fenol/flavonoidleri ve uçucu yağ kalitesini iyileştirmiştir (ElSayed ve ark., 2019; Soni ve Abdin, 2017; Zhou ve ark., 2025; Kamyab ve ark., 2024).

Moleküler ve genetik düzeyde savunma, artık birçok tıbbi türde doğrudan izlenebilmektedir. Tatlı fesleğende şiddetli kuraklıkta CVOMT ve EOMT ekspresyonu sırasıyla yaklaşık 6.46 ve 46.33 kat artmış; buna metilkavikol ve metileugenol birikimi eşlik etmiştir. Meyan kökünde JA biyosentezi ve sinyal iletimine ait LOX2, AOS, AOC, ACAA, MFP2, JAZ ve MYC2 ile glisirizik asit/flavonoid yollarına ait PAL, C4H, 4CL, CHS, HMGR, SQS, SQLE, β -AS, CYP88D6, CYP72A154 ve UGT ekseni kuraklıkla aktive olmuştur (Mandoulakani ve ark., 2017; Yao ve ark., 2022). Biberiyede 12 terpen biyosentez geninin RT-qPCR ile izlenmesi, stres şiddetine göre terpene sınıflarının kaymasını açıklamıştır. Adaçayında ise bornyl ve sabinene sentezazlarının yukarı, cineole synthase'ın aşağı regülasyonu monoterpen artışıyla ilişkilendirilmiştir. Sandal ağacında (*Santalum album*) SaAREB6'nın, SaCYP736A167 promotörünü doğrudan hedefleyerek santalol biyosentezini kuraklık altında artırması, ABA-duyarlı transkripsiyon faktörlerinin tıbbi kaliteyi de yönettiğini göstermektedir (Mandoulakani ve ark., 2017; Yao ve ark., 2022; Darwish ve ark., 2026; Radwan ve ark., 2017; Meng ve ark., 2025).

Ekolojik ve uyum stratejileri bu ağın saha ölçeğindeki karşılığıdır. Arbusküler mikorizal mantarlar, endofitler ve yararlı bakteriler; besin alımı, antioksidan kapasite ve sekonder metabolit yolları üzerinden kuraklık etkisini hafifletebilir (Leggatt ve ark., 2023; Kamyab ve ark., 2024), *S. rosmarinus*'ta AMF uygulaması morfolojiyi belirgin biçimde değiştirmeden terpene synthase ekspresyonunu modüle etmiş; bazı kültürlerde β -karyofilen, linalool ve cineole ile ilişkili yolları güçlendirmiştir. *T. vulgaris*'te endofit + FeNP kombinasyonları oksidan yükünü azaltırken fenol, flavonoid ve uçucu yağ kalitesini artırmıştır. Bu bulgular, kuraklığa dayanıklılığın yalnızca bitkinin "iç" genetik yapısı değil, aynı zamanda mikrobiyom ve yetiştirme sistemi tarafından şekillenen ekolojik bir fenotip olduğunu göstermektedir (Leggatt ve ark., 2023; Kamyab ve ark., 2024; Aslani ve ark., 2023; Alipour ve ark., 2025).

Savunma düzeyi	Başlıca yanıt	Belirteç/genler	Temsilî tür	Kaynak
Fizyolojik	Stoma kapanması, RWC korunumu, WUE artışı, hormonal yeniden denge	NCED, ABA8Ox, RBOH	<i>Melissa officinalis</i>	Ahmadi ve ark., 2019
Morfolojik	Yaprak alanının küçülmesi, büyümenin baskılanması, kök/sürgün dengesinin kayması	Çoğu çalışmada genetik belirteç açıkça belirtilmemiştir	<i>S. officinalis</i> , <i>M. sylvestris</i>	Örs ve Ekinci, 2015; Şahin ve Torun, 2024

Savunma düzeyi	Başlıca yanıt	Belirteç/genler	Temsilî tür	Kaynak
Biyokimyasal	ROS detoksifikasyonu ve ozmotik ayarlama	SOD, CAT, APX, POD, GR, DHAR, 1-Cys-Prx, PrxQ; P5CS1/2, P5CR, ProDH, P5CDH	<i>S. marianum</i> , <i>A. annua</i>	ElSayed ve ark., 2019; Soni ve Abdin, 2017
Sekonder metabolit savunması	Fenilpropanoid, flavonoid, lignin ve fenolik uçucu yağların artırılması	PAL, C4H, 4CL, CHS, CVOMT, EOMT, RAS	<i>O. basilicum</i> , <i>S. marianum</i> , <i>M. officinalis</i>	Mandoulakani ve ark., 2017; ElSayed ve ark., 2019; Ahmadi ve ark., 2019
Moleküler	ABA/JA/ROS çapraz konuşması	LOX2, AOS, AOC, ACAA, MFP2, JAZ, MYC2	<i>Glycyrrhiza uralensis</i>	Yao ve ark., 2022
Genetik/transkripsiyonel	Uçucu yağ ve terpen biyosentezinin TF ve yolak genleriyle kontrolü	SrGPS, SrFPPS, SrGGPP, SrTPS-Pin, SrHUMS...; SaAREB6 → SaCYP736A167; cs, ss, bpps	<i>S. rosmarinus</i> , <i>S. album</i> , <i>S. officinalis</i>	Darwish ve ark., 2026; Meng ve ark., 2025; Radwan ve ark., 2017
Ekolojik/uyum	AMF, endofit ve biyostimulan destekli tolerans	Terpene synthase ekspresyonu, PAL/PPO , fenol/flavonoid/EO artışı	<i>S. rosmarinus</i> , <i>T. vulgaris</i>	Leggatt ve ark., 2023; Kamyab ve ark., 2024

Sonuç

Kuraklık, tıbbi bitkilerde su kaybı ve fotosentetik baskı ile başlayan, ROS birikimi, hormon sinyali, sekonder metabolit yeniden dağılımı ve gen ifadesi değişimleriyle derinleşen bütüncül bir stres senaryosu oluşturur. Verim düşüşü çoğu türde ortak olsa da farmakolojik kaliteye ilişkin yanıt aynı derecede öngörülebilir değildir: orta şiddette stres bazı aktif bileşikler artırabilirken, uzun ve ağır stres toplam drog verimini, yağ verimini veya belirli bileşiklerin mutlak üretimini azaltabilir. Bu nedenle tıbbi bitkilerde kuraklık yönetimi, “stresi tamamen ortadan kaldırma” değil, “türü ve kemotipi tanımlanmış, kalite izlemeli stres optimizasyonu” olarak kurgulanmalıdır. Uygulamada bunun karşılığı; tür ve kemotipe özgü defisit sulama protokollerinin geliştirilmesi, yalnızca biyokütle değil hedef metabolit profili üzerinden karar verilmesi, yararlı mikrobiyal ortaklıkların üretim sistemlerine entegrasyonu ve kuraklığa dayanıklı yerel kemotiplerin korunmasıdır. Koruma açısından in situ ve ex situ programlarda, yalnızca taksonomik çeşitlilik değil kuraklık altında metabolit istikrarı da seçim ölçütü olmalıdır; bu, güncel iklim baskıları altında özellikle Akdeniz kökenli türler için kritik bir çıkarımdır. Gelecek araştırmaların önceliği ise çok-omikli fenotipleme ile kalite belirteçlerinin eşleştirilmesi, aday genlerin fonksiyonel doğrulanması, stres belleği ve epigenetik düzenlemelerin açıklanması ve mikrobiyom-temelli kuraklık biyoteknolojilerinin standardize edilmesi olmalıdır. Özellikle fesleğen, kekik, biberiye ve meyan kökü gibi türlerde metabolom + transkriptom + hormon analizlerinin aynı deney düzeneğinde birleştirilmesi, kalite-tolerans dengesini yöneten gerçek düzenleyici düğümlerin bulunması açısından umut vericidir.

Kaynakça

- Ahmadi, T., Shabani, L., & Sabzalian, M. R. (2019). Improvement in drought tolerance of lemon balm, *Melissa officinalis* L. under the pre-treatment of LED lighting. *Plant Physiology and Biochemistry*, 139, 548–557. doi:10.1016/j.plaphy.2019.04.021.
- Alipour, M. A., Haghighi, M. H., Rahimmalek, M., Reichelt, M., Martinelli, L., Groten, K., & Mithöfer, A. (2025). Integrated metabolomics, transcriptomic, and phytohormonal analyses to study the effects of water stress and foliar abscisic acid application in *Thymus* species using LC-MS/MS. *Frontiers in Plant Science*, 16, 1557446. doi:10.3389/fpls.2025.1557446.
- Aslani, Z., Hassani, A., Abdollahi Mandoulakani, B., Barin, M., & Maleki, R. (2023). Effect of drought stress and inoculation treatments on nutrient uptake, essential oil and expression of genes related to monoterpenes in sage (*Salvia officinalis*). *Scientia Horticulturae*, 309, 111610. doi:10.1016/j.scienta.2022.111610.
- Bistgani, Z. E., Barker, A. V., & Hashemi, M. (2024). Physiology of medicinal and aromatic plants under drought stress. *The Crop Journal*, 12(2), 330–339. doi:10.1016/j.cj.2023.12.003.
- Darwish, D. B. E., Ali, M., Soudy, F. A., et al. (2026). Effects of drought duration on terpene profiles, physiological responses, and terpene-related gene expression in rosemary. *BMC Plant Biology*, 26, 386. doi:10.1186/s12870-026-08193-7.
- ElSayed, A. I., El-hamamy, M. A. M., Rafudeen, M. S., Mohamed, A. H., & Omar, A. A. (2019). The impact of drought stress on antioxidant responses and accumulation of flavonolignans in milk thistle (*Silybum marianum* (L.) Gaertn.). *Plants*, 8(12), 611. doi:10.3390/plants8120611.
- IPCC. (2023). *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Geneva: IPCC. doi:10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001.
- Kamyab, A., Samsampour, D., Ahmadinasab, N., et al. (2024). The combination of nanoparticles and endophytes boosts thyme (*Thymus vulgaris* L.) resistance to drought stress by elevating levels of phenolic compounds, flavonoids, and essential oils. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 11, 163. doi:10.1186/s40538-024-00682-x.
- Leggatt, E., et al. (2023). Addition of arbuscular mycorrhizal fungi enhances terpene synthase expression in *Salvia rosmarinus* cultivars. *Life*, 13(2), 315. doi:10.3390/life13020315.
- Mandoulakani, B. A., Eyvazpour, E., & Ghadimzadeh, M. (2017). The effect of drought stress on the expression of key genes involved in the biosynthesis of phenylpropanoids and essential oil components in basil (*Ocimum basilicum* L.). *Phytochemistry*, 139, 1–7. doi:10.1016/j.phytochem.2017.03.006.
- Meng, S., Lian, N., Qin, F., Yang, S., et al. (2025). The AREB transcription factor SaAREB6 promotes drought stress-induced santalol biosynthesis in sandalwood. *Horticulture Research*, 12, uhae347. doi:10.1093/hr/uhae347.
- Örs, S., & Ekinici, M. (2015). Kuraklık stresi ve bitki fizyolojisi. *Derim*, 32(2), 237–250. doi:10.16882/derim.2015.90060.
- Radwan, A., Kleinwächter, M., & Selmar, D. (2017). Impact of drought stress on specialised metabolism: Biosynthesis and the expression of monoterpene synthases in sage (*Salvia officinalis*). *Phytochemistry*, 141, 20–26. doi:10.1016/j.phytochem.2017.05.005.

Şahin, S., & Torun, H. (2024). Kuraklığın ebegümeçi (*Malva sylvestris* L.) bitkisinin su durumu, büyümesi ve antioksidan sistem üzerine etkisi. *Düzce Üniversitesi Orman Fakültesi Ormancılık Dergisi*, 20(2), 28–40. doi:10.58816/duzceod.1598233.

Soni, P., & Abdin, M. Z. (2017). Water deficit-induced oxidative stress affects artemisinin content and expression of proline metabolic genes in *Artemisia annua* L. *FEBS Open Bio*, 7(3), 367–381. doi:10.1002/2211-5463.12184.

Tan, U., & Gören, H. K. (2024). Comprehensive evaluation of drought stress on medicinal plants: A meta-analysis. *PeerJ*, 12, e17801. doi:10.7717/peerj.17801.

Yao, H., Wang, F., Bi, Q., Liu, H., Liu, L., Xiao, G., Zhu, J., Shen, H., & Li, H. (2022). Combined analysis of pharmaceutical active ingredients and transcriptomes of *Glycyrrhiza uralensis* under PEG6000-induced drought stress revealed glycyrrhizic acid and flavonoids accumulation via JA-mediated signaling. *Frontiers in Plant Science*, 13, 920172. doi:10.3389/fpls.2022.920172.

Zhou, Y., Ma, G., Li, W., Xie, L., Zhan, S., Yao, X., Zuo, Z., & Tian, D. (2025). Analysis of volatile metabolome and transcriptome in sweet basil under drought stress. *Current Issues in Molecular Biology*, 47(2), 117. doi:10.3390/cimb47020117.

Automated Generation of Engineering Revision Comparison Reports Using Robotic Process Automation in Product Lifecycle Management Environments

Burak BARIŞKAN

Burak.bariskan@tofas.com.tr; TOFAŞ Türk Otomobil Fabrikası A.Ş. R&D Center, Bursa / Türkiye.

Özet

Mühendislik değişiklik yönetimi ve revizyon takibi, otomotiv ürün geliştirme süreçlerinde kritik bir rol oynar. Mühendisler, tasarım değişikliklerini belirlemek, olası etkilerini değerlendirmek ve bu farkları mühendislik inceleme süreçleri için belgelemek amacıyla üç boyutlu tasarım verilerinin farklı revizyonlarını sık sık karşılaştırırlar. Ancak revizyon karşılaştırma dokümantasyonunun oluşturulması genellikle el ile yapılan ve zaman alıcı bir iştir. Mühendisler üç boyutlu tasarım modellerini görsel olarak karşılaştırmak, farkların ekran görüntülerini almak, ürün yaşam döngüsü yönetimi sistemlerinden malzeme ve montaj bilgilerini çekmek ve teknik raporlar ya da sunumlar hazırlamak zorundadır. Bu çalışma, mühendislik revizyon karşılaştırma raporlarının oluşturulmasını otomatikleştirmek amacıyla tasarlanmış bir Robotik Süreç Otomasyonu çözümünün geliştirilmesini sunmaktadır. Önerilen sistem, üç boyutlu tasarım modellerin görsel karşılaştırılması için ürün yaşam döngüsü ortamlarından otomatik veri çekimini bütünleştirir. Robotik Süreç Otomasyonu botu, karşılaştırma ortamından önceden tanımlanmış görsel alanları yakalar, ürün yaşam döngüsü arayüzünden malzeme ve revizyon bilgilerini çıkarır ve tespit edilen farkları özetleyen yapılandırılmış bir sunum raporunu otomatik olarak oluşturur. Otomasyon altyapısı, birden fazla mühendislik aracı arasındaki etkileşimi koordine eder. Geliştirilen çözüm, mühendislik karşılaştırma dokümantasyonunun hazırlanma süresini önemli ölçüde azaltırken raporlama tutarlılığını artırmakta ve manuel iş yükünü düşürmektedir. Sonuçlar, Robotik Süreç Otomasyonu teknolojilerinin dijital ürün geliştirme ortamlarında mühendislik iş akışlarını etkin şekilde destekleyebileceğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Dijital Mühendislik Otomasyonu, Mühendislik Değişiklik Yönetimi, Ürün yaşam döngüsü, Robotik Süreç Otomasyonu.

Abstract

Engineering change management and revision tracking play a critical role in automotive product development processes. Engineers frequently compare different revisions of three-dimensional (3D) design data in order to identify design modifications, evaluate their potential impact, and document these differences for engineering review processes. However, generating revision comparison documentation is typically a manual and time-consuming task. Engineers must visually compare CAD models, capture screenshots of the differences, retrieve material and assembly information from product lifecycle management (PLM) systems, and prepare technical reports or presentations. This study presents the development of a Robotic Process Automation (RPA) solution designed to

automate the generation of engineering revision comparison reports. The proposed system integrates Siemens Vismockup for visual comparison of 3D models with automated data retrieval from the Teamcenter PLM environment. The RPA bot captures predefined visual regions from the comparison environment, extracts material and revision information from the PLM interface, and automatically generates a structured PowerPoint report summarizing the identified differences. The automation framework is implemented using Automation Anywhere and coordinates interactions between multiple engineering tools including Vismockup, Teamcenter, Excel, and PowerPoint. The developed solution significantly reduces the time required to prepare engineering comparison documentation while improving reporting consistency and reducing manual workload. The results demonstrate that RPA technologies can effectively support engineering workflows in digital product development environments.

Keywords: Digital Engineering Automation, Engineering Change Management, Product Lifecycle Management, Robotic Process Automation.

1. INTRODUCTION

The automotive industry has undergone a major digital transformation with the widespread adoption of computer-aided engineering (CAE), computer-aided design (CAD), and Product Lifecycle Management (PLM) systems. Modern vehicle development processes involve thousands of interconnected components, complex assemblies, and multidisciplinary engineering activities that must be managed throughout the product lifecycle. As vehicle complexity increases, engineering teams are required to handle a large amount of digital product data and continuously manage design revisions, engineering changes, and configuration updates.

Engineering Change Management (ECM) is one of the most critical activities in automotive product development. During the development lifecycle, components are frequently revised due to functional improvements, manufacturing constraints, supplier updates, cost optimization, or regulatory requirements. These revisions must be carefully analyzed and documented to ensure product quality and traceability. Inefficient management of engineering changes may increase development costs, prolong product release cycles, and create communication problems between engineering departments (Hammer, Champy, 1993).

PLM systems such as Teamcenter are widely used in the automotive industry to manage product structures, revisions, material information, and engineering workflows. These systems provide a centralized environment for storing and controlling digital engineering data throughout the product lifecycle. In addition, digital mock-up and 3D visualization tools such as VisMockup enable engineers to visually compare different revisions of components and assemblies. Engineers often analyze geometric differences between revisions in order to identify design modifications and evaluate their potential effects on neighboring systems. Studies published by the IEEE emphasize that digital engineering platforms play a critical role in improving collaboration and traceability within product development environments.

Although advanced digital engineering tools are available, the documentation process of revision comparisons is still largely manual. Engineers are generally required to perform several repetitive operations, including opening multiple revisions, visually inspecting changes, capturing screenshots, retrieving material and revision data from PLM systems, and preparing engineering comparison reports or presentations. These tasks are time-consuming and highly dependent on manual interaction with graphical user interfaces.

Previous studies in the literature emphasize that repetitive engineering documentation activities reduce engineering efficiency and create non-value-added workloads within product development processes. It is highlighted that repetitive manual operations reduce productivity and limit the time available for value-added engineering activities. Researchers have also emphasized the importance of automation technologies for improving engineering productivity, reducing human error, and accelerating engineering decision-making processes (Poppendieck's, 2003).

In recent years, Robotic Process Automation (RPA) has emerged as an effective technology for automating repetitive digital tasks performed in software environments. RPA is defined as a software technology that mimics human interactions with digital systems through actions such as clicking, typing, copying data, navigating interfaces, and generating documents. Unlike traditional software integration approaches, RPA can operate directly on existing graphical user interfaces without requiring major modifications to enterprise systems. According to studies and industrial reports published by UiPath, RPA technologies significantly improve operational efficiency and reduce repetitive workload in enterprise processes.

Several studies have investigated the application of RPA in business operations, finance, healthcare, and manufacturing processes. However, limited research has focused specifically on the automation of engineering revision comparison and reporting processes within PLM-based automotive development environments. Existing engineering workflows still rely heavily on manual report preparation despite the repetitive and rule-based nature of these tasks. Therefore, there is a need for an automated framework capable of integrating PLM systems, visualization tools, and document generation processes into a unified workflow.

The main research problem addressed in this study is the excessive manual effort required for preparing engineering revision comparison reports in automotive product development processes. According to internal workflow observations, preparing a single engineering comparison report may require approximately two hours of manual work per engineering change request (ECR) or design proposal. Considering that an engineer may process around 30 engineering changes annually, the total documentation workload may exceed 60 hours per engineer each year. This situation negatively affects engineering efficiency and limits the time available for value-added engineering analysis activities.

In this context, this study proposes an RPA-based framework for automating engineering comparison report generation by integrating PLM data retrieval, visual comparison outputs, and automated document creation processes. The proposed approach aims to reduce manual workload, improve reporting consistency, minimize human error, and accelerate engineering documentation activities. Furthermore, the study contributes to the literature by demonstrating the applicability of RPA technologies within digital engineering and PLM-centered automotive workflows.

2. METHODOLOGY

2.1.Engineering Comparison Workflow

2.1.1. Conventional Manual Workflow

The conventional workflow for generating engineering comparison reports involves several manual steps.

First, engineers retrieve two different revisions of the same component from the PLM system. These revisions are then loaded into the digital mock-up environment where geometric differences can be analyzed.

The models are visually compared by coloring different revisions (for example, green for new geometry and red for the previous revision). After identifying the differences, screenshots are captured and added to a presentation file. Additional zoomed views are often required to clearly highlight design modifications.

Finally, engineers retrieve material information and assembly details from the engineering drawing or PLM interface and include this information in the report.

Figure 1 illustrates the conventional workflow for revision comparison documentation.

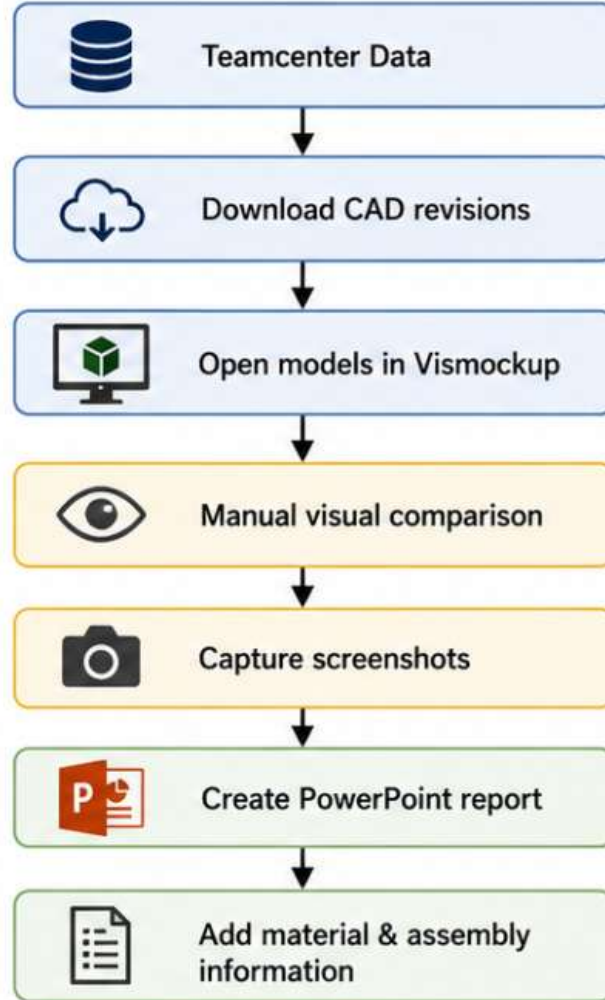


Figure 1. *Conventional manual revision comparison workflow*

2.2. RPA-Based Automation Framework

2.2.1. System Architecture

The proposed solution introduces a robotic process automation framework that coordinates multiple engineering tools in order to automate the reporting process. The automation system integrates the following software components:

- Siemens Vismockup (3D visualization)
- Teamcenter PLM
- Microsoft Excel
- Microsoft PowerPoint

- Automation Anywhere RPA platform

Figure 2 illustrates the overall system architecture.

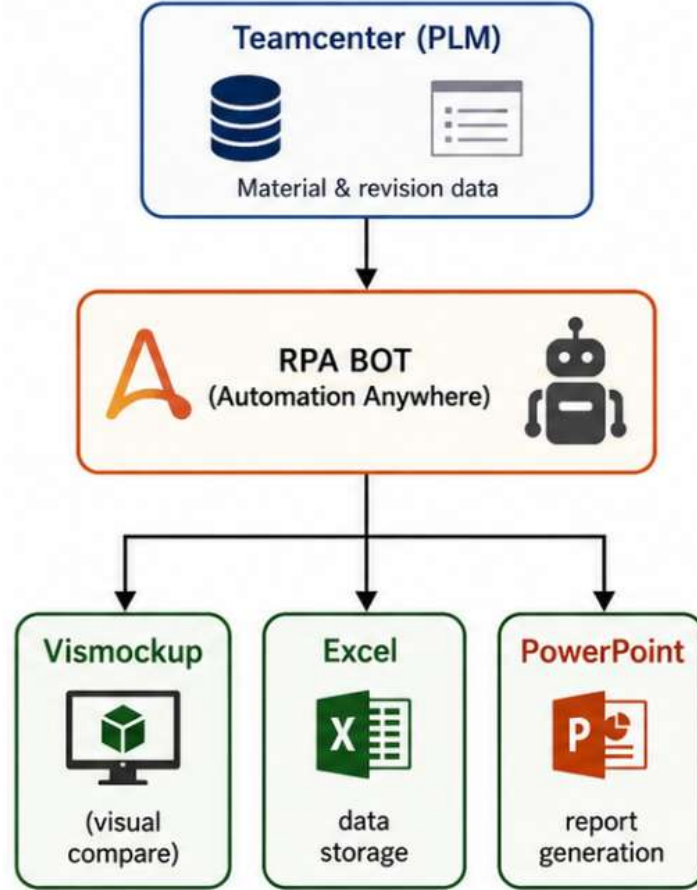


Figure 2. RPA system architecture for automated report generation

The RPA bot acts as the central coordinator between these systems.

2.3.Automation Workflow

The automation workflow is divided into several modules in order to ensure flexibility and maintainability.

2.3.4. Input Data Preparation

The first stage of the automation process involves identifying the design revisions to be compared. Currently, the two revisions are manually downloaded from Teamcenter and placed in predefined folders.

The automation system detects these folders based on naming conventions such as:

RevA_Component

RevB_Component

Once the input data is identified, the bot initializes the automation sequence.

2.3.5. Visual Comparison and Screenshot Capture

The visual comparison between the two revisions is performed using Vismockup.

After the models are loaded and aligned, the RPA bot activates the Vismockup window and captures screenshots of predefined regions of the screen. Multiple screenshots may be captured to highlight different areas of the component.

Each screenshot is automatically named and stored according to the component identifier and comparison index.

2.3.6. PLM Data Retrieval

Material and revision information is retrieved from the Teamcenter interface using UI automation.

The bot performs the following operations:

- searches for the component identifier,
- navigates to the drawing or properties section,
- extracts material information,
- retrieves revision identifiers.

The extracted information is temporarily stored in an Excel file before being used in the reporting stage.

AUTOMATED REPORT GENERATION

The final stage of the automation workflow involves generating the comparison report.

A predefined PowerPoint template is used to ensure consistent formatting. The RPA bot automatically inserts screenshots and corresponding textual descriptions into the presentation slides.

Figure 3 illustrates the automated workflow implemented by the RPA bot.

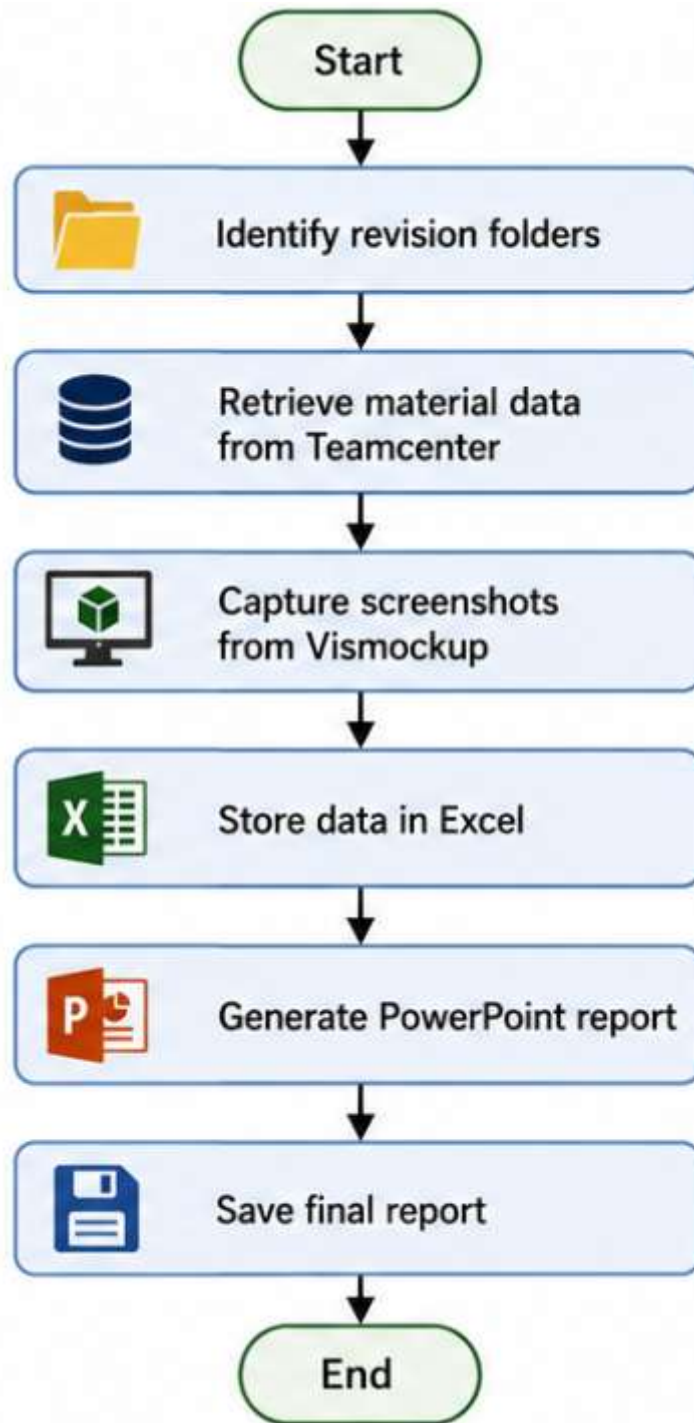


Figure 3. Automated RPA workflow

3. RESULTS AND DISCUSSION

The implementation of the proposed automation system provides several practical benefits for engineering workflows.

First, the automation significantly reduces the time required to generate revision comparison reports. Tasks such as screenshot capture, data copying, and presentation preparation are executed automatically by the boat.

Second, the automated process ensures consistent formatting and documentation structure across different engineering reports. This improves traceability and readability of design change documentation.

Third, automation reduces the likelihood of human error during repetitive tasks such as copying material information or naming files.

The developed solution does not replace the engineer's role in analyzing design differences. Instead, it eliminates repetitive documentation tasks and allows engineers to focus on higher-value analytical work.

4. CONCLUSION

This study presents a robotic process automation framework designed to support engineering revision comparison workflows in automotive product development environments.

By integrating Vismockup visual comparison, Teamcenter data retrieval and automated PowerPoint report generation, the proposed system significantly reduces manual workload associated with engineering documentation.

The implementation demonstrates that RPA technologies can effectively enhance engineering productivity without requiring major modifications to existing software infrastructure. The automation framework also improves documentation consistency and reduces the risk of human error.

Future work may include integrating automated geometric difference detection, implementing API-based PLM data retrieval, and expanding the automation framework to other engineering documentation processes.

REFERENCES

- Automation Anywhere. (n.d.). *Automation Anywhere enterprise platform documentation*.
- Hammer, M., & Champy, J. (1993). *Reengineering the corporation: A manifesto for business revolution*. Harper Business.
- IEEE. (n.d.). *Publications on product lifecycle management and engineering data management*.
- IEEE Task Force on Process Mining. (n.d.). *Process automation in engineering workflows*.
- Poppendieck, M., & Poppendieck, T. (2003). *Lean software development: An agile toolkit*. Addison-Wesley.
- Siemens. (n.d.). *Documentation on Teamcenter and digital engineering workflows*.
- Siemens Digital Industries Software. (n.d.). *Teamcenter product lifecycle management documentation*.
- Siemens PLM Software. (n.d.). *VisMockup visualization and digital mock-up tools*.
- UiPath. (n.d.). *Studies and whitepapers on robotic process automation in industrial applications*.
- van der Aalst, W. (2018). *Robotic process automation*. Springer.

Araç Aydınlatma için Opto-Elektronik Güncel Teknolojiler

Ender KUMRAL

ender.kumral@tofas.com.tr; Tofaş Türk Otomobil Fabrikası Ar-Ge Merkezi, Bursa / Türkiye.

Özet

Bu çalışma, otomotiv aydınlatma teknolojilerinin son yirmi yılda geçirdiği dönüşümü incelemektedir. Halojen ve ksenon sistemlerden yarı iletken tabanlı ışık yayan diyot (LED), organik ışık yayan diyot (OLED), mikro ışık yayan diyot (MicroLED) ve lazer tabanlı teknolojilere geçiş, aydınlatma sistemlerini yalnızca enerji açısından daha verimli hâle getirmekle kalmamış, aynı zamanda yazılım kontrollü, sensörle entegre ve yüksek çözünürlüklü yapılara dönüştürmüştür. Özellikle MicroLED tabanlı piksel far sistemleri, ışık dağılımının hassas şekilde kontrol edilmesini sağlayarak sürüş güvenliğini artırmaktadır. OLED teknolojisi estetik ve homojen aydınlatma sunarken, lazer farlar uzun menzilli aydınlatma performansı ile öne çıkmaktadır. Ayrıca dijital ışık işleme (DLP) sistemleri yol üzerine bilgi yansıtılmasını mümkün kılmaktadır. Bu gelişmeler, araç aydınlatmasının gelecekte aktif bir güvenlik ve iletişim sistemi olacağını göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Adaptif sürüş farı, Dijital ışık işleme, Lazer farlar, MicroLED, OLED

Abstract

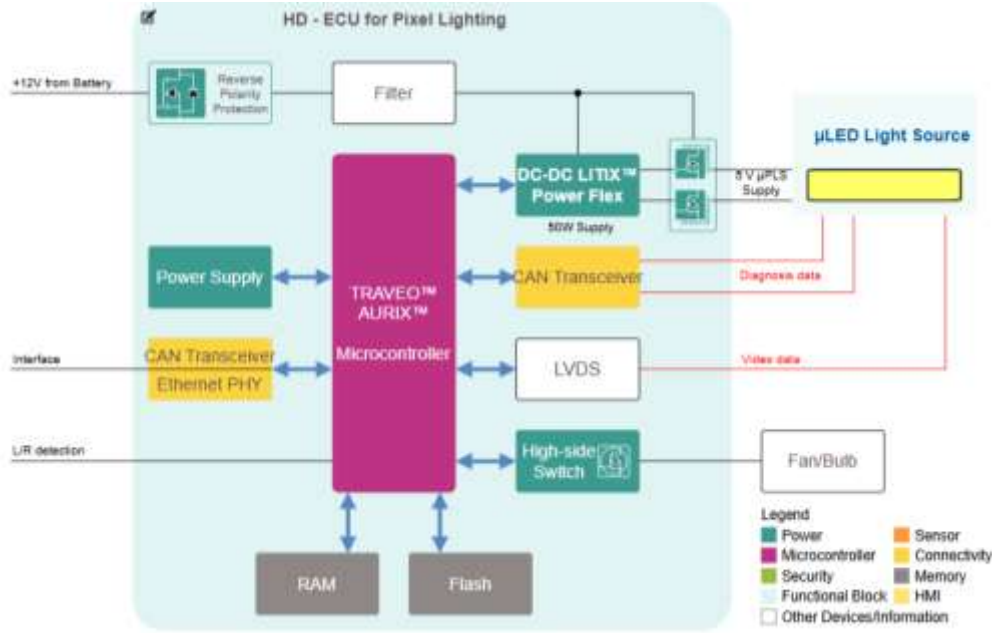
This study examines the transformation of automotive lighting technologies over the past two decades. The transition from halogen and xenon systems to semiconductor-based technologies—namely light-emitting diodes (LED), organic light-emitting diodes (OLED), micro light-emitting diodes (MicroLED), and laser-based systems—has not only improved energy efficiency but also enabled the development of software-controlled, sensor-integrated, and high-resolution lighting architectures. In particular, MicroLED-based pixel headlamp systems enhance driving safety by enabling precise control of light distribution. While OLED technology offers aesthetic and homogeneous illumination, laser headlamps provide superior long-range lighting performance. Furthermore, digital light processing (DLP) systems enable the projection of information onto the road surface. These advancements indicate that automotive lighting will evolve into an active safety and communication system in the future.

Keywords: Adaptive driving beam, digital light processing, laser headlamps, MicroLED, OLED

GİRİŞ

Otomotiv aydınlatması, son yıllarda yalnızca sürüş görünürlüğünü sağlayan bir sistem olmaktan çıkarak araç güvenliği, kullanıcı deneyimi ve araçlar arası iletişimin önemli bir bileşeni hâline gelmiştir (Yole Group, 2025). Geleneksel halojen ve ksenon tabanlı sistemlerin yerini, daha verimli ve hassas şekilde kontrol edilebilir yarı iletken tabanlı çözümler almıştır (EngineeringMix, 2025). Bu dönüşümde

ışık yayan diyot (LED) teknolojisi, düşük enerji tüketimi ve uzun ömür avantajları ile temel teknoloji hâline gelirken, artan çözünürlük ihtiyacı mikro ışık yayan diyot (MicroLED) teknolojisinin gelişimini hızlandırmıştır (Infineon & Nichia, 2023; Semiconductor Today, 2025). MicroLED tabanlı sistemler, yüksek piksel yoğunluğu sayesinde ışık dağılımının hassas şekilde kontrol edilmesini sağlayarak adaptif sürüş fonksiyonlarının performansını önemli ölçüde artırmaktadır. Organik ışık yayan diyot (OLED) teknolojisi homojen yüzey aydınlatması ile özellikle arka aydınlatmada estetik ve tasarımsal avantajlar sunarken, lazer far sistemleri yüksek ışık yoğunluğu ve uzun menzil özellikleri ile öne çıkmaktadır (EngineeringMix, 2025; NumberAnalytics, 2025). Günümüzde aydınlatma sistemleri yalnızca ışık üretimi ile sınırlı kalmayıp, dijital ışık işleme (DLP) teknolojileri sayesinde projeksiyon tabanlı bilgi aktarımını da mümkün kılmaktadır (IEEE, n.d.). Bu sistemler, sensör verileri ve araç içi haberleşme altyapıları ile entegre çalışarak aydınlatmayı aktif bir güvenlik, iletişim ve bilgi aktarım bileşeni hâline getirmektedir (Yole Group, 2025; NumberAnalytics, 2025). Ayrıca modern otomotiv aydınlatma sistemlerinde yalnızca ışık kaynakları değil, bu sistemleri yöneten elektronik kontrol altyapısı da kritik rol oynamaktadır. Güncel far sistemleri, güç yönetimi, veri iletişimi ve yüksek hızlı kontrol mekanizmalarını bir araya getiren karmaşık elektronik kontrol üniteleri (ECU) ile çalışmaktadır. Bu yapılarda mikrodenetleyici tabanlı kontrol birimleri, güç dağıtım devreleri ve haberleşme modülleri birlikte çalışarak ışık dağılımının hassas biçimde yönetilmesini sağlamaktadır. Özellikle MicroLED tabanlı sistemlerde her bir pikselin bağımsız kontrol edilmesi gerektiğinden, yüksek işlem kapasitesine sahip kontrol mimarileri kullanılmaktadır. Bu durum, opto-elektronik sistemler ile gömülü elektronik altyapı arasındaki etkileşimin kritik önemini ortaya koymaktadır (Şekil 1). MicroLED tabanlı piksel aydınlatma sistemi için elektronik kontrol ünitesi (ECU) mimarisi. Şemada güç kaynağı, ters polarite koruma, filtreleme birimleri, mikrodenetleyici (TRAVEO™ AURIX™), CAN haberleşme modülü, LVDS veri hattı ve μ LED ışık kaynağı arasındaki bağlantılar gösterilmektedir. Sistem hem güç yönetimi hem de yüksek hızlı veri iletimini sağlayarak piksel bazlı ışık kontrolünü mümkün kılmaktadır. (Kaynak: Infineon Technologies, 2023)



Şekil 1. Karmaşık LED sürücü devresi şeması. Şemada güç kaynağı, filtreleme birimleri ve kontrol devreleri ile LED modüllerin entegre çalışma prensibi gösterilmektedir. (Kaynak: Infineon Technologies, 2023)

YÖNTEM

1. LED Teknolojisindeki Gelişmeler

LED teknolojisi, düşük enerji tüketimi, uzun ömrü, titreşimlere karşı dayanıklılığı ve hızlı tepki süreleri sayesinde günümüz otomotiv aydınlatma sistemlerinin temel bileşeni hâline gelmiştir. Özellikle enerji verimliliği, elektrikli araçlarda menzil açısından önemli bir avantaj sağlamaktadır. Bunun yanı sıra LED'lerin sağladığı tasarım esnekliği, marka kimliğini yansıtan özgün gündüz farı imzalarının yaygınlaşmasına olanak tanımıştır. Günümüzde kullanılan LED modüller, daha kompakt optik yapılar ve daha yüksek lümen/watt değerleri ile önceki nesillere kıyasla önemli ölçüde gelişmiştir. Bununla birlikte, LED teknolojisi büyük ölçüde olgunlaşmış olsa da özellikle adaptif sürüş fonksiyonlarında ihtiyaç duyulan yüksek çözünürlük ve hassas ışık kontrolü, yeni nesil teknolojilere olan ihtiyacı ortaya çıkarmıştır. Bu noktada MicroLED teknolojisi öne çıkmakta ve piksel bazlı kontrol kabiliyeti ile aydınlatma sistemlerinde yeni bir yaklaşım sunmaktadır. Öte yandan, matrix LED sistemleri de bu dönüşümün önemli bir adımı olarak kabul edilmektedir. Bu sistemlerde far ünitesi, birbirinden bağımsız kontrol edilebilen çok sayıda LED segmentine ayrılmaktadır. Araç üzerindeki sensörlerden (özellikle kamera sistemlerinden) elde edilen veriler doğrultusunda, bu segmentler çok kısa süreler içinde açılıp kapatılarak ışık dağılımı dinamik biçimde şekillendirilebilmektedir. Modern sistemlerde LED sayısı yüzler seviyesinden başlayarak MicroLED teknolojisi ile birlikte binler seviyesine kadar

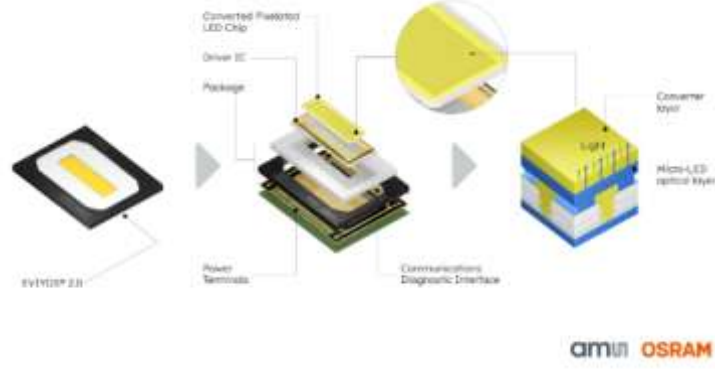
ulaşabilmektedir. Bu yapı sayesinde araç, karşıdan gelen diğer sürücülerin gözünü kamaştırmadan yalnızca ilgili bölgeyi maskeleyebilmekte, geri kalan alanı ise uzun far seviyesinde aydınlatmaya devam edebilmektedir.

2. Akıllı Aydınlatma Sistemleri

Günümüzde araç aydınlatması, sabit karakteristiklere sahip bir sistem olmaktan çıkarak çevresel koşullara ve sürüş durumuna göre sürekli kendini uyarlayan “akıllı” bir yapıya dönüşmüştür. Bu sistemler; araç hızı, direksiyon açısı, ortam aydınlatması, hava koşulları, yaya ve araç tespiti gibi farklı sensör verilerini eş zamanlı olarak değerlendirerek çalışır. Ayrıca navigasyon verilerinin de sisteme entegre edilmesiyle, yaklaşan yol geometrisine veya potansiyel risklere göre önceden aksiyon alınabilmektedir. Elde edilen bu veriler doğrultusunda aydınlatma sistemi, ışık dağılımını dinamik olarak optimize edebilmekte, belirli bölgeleri vurgulayabilmekte ya da tehlike oluşturabilecek unsurlara dikkat çekebilmektedir. Örneğin, gelişmiş akıllı far sistemleri yol kenarında bulunan bir yayayı algılayarak ilgili bölgeyi aydınlatabilir veya MicroLED tabanlı piksel farlar aracılığıyla sürücünün dikkatini belirli bir noktaya yönlendirebilir. Bu bağlamda akıllı aydınlatma sistemleri, yalnızca aydınlatma sağlamanın ötesine geçerek aktif bir güvenlik ve sürücü destek fonksiyonuna dönüşmektedir. Günümüzde bu kapsamda değerlendirilebilecek başlıca teknolojiler arasında MicroLED tabanlı yüksek çözünürlüklü piksel farlar, OLED tabanlı yüzey aydınlatma çözümleri, lazer far sistemleri ve dijital ışık işleme (DLP) tabanlı projeksiyon teknolojileri yer almaktadır.

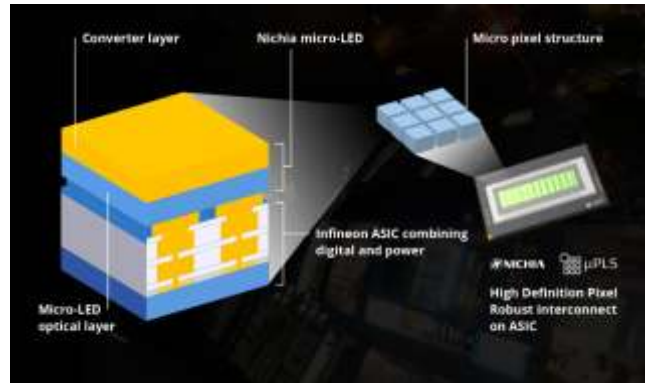
2.1 MicroLED Tabanlı Yüksek Çözünürlüklü Piksel Farlar

MicroLED teknolojisi, günümüz itibarıyla otomotiv aydınlatma alanındaki en yenilikçi yaklaşımlardan biri olarak öne çıkmaktadır. Geleneksel LED sistemlerine kıyasla çok daha yüksek piksel yoğunluğu sunan bu yapı, ışığın doğrudan kaynak seviyesinde modüle edilmesine olanak tanıyarak aydınlatma sistemlerinde yeni bir dönemin başlangıcını temsil etmektedir. Bu alandaki önemli endüstriyel uygulamalardan biri, ams OSRAM tarafından geliştirilen EVIYOS 2.0 platformudur. Bu sistemde, galyum nitrür (GaN) tabanlı bir çip üzerinde yaklaşık 25.600 MicroLED piksel yer almakta ve her bir piksel uygulamaya özel tümleşik devre (ASIC) üzerinden bağımsız olarak kontrol edilebilmektedir. Bu sayede araç farları, yüksek çözünürlüklü ışık dağılımını gerçek zamanlı olarak oluşturabilmektedir (Şekil 2).



Şekil 2. EVIYOS 2.0 MicroLED tabanlı piksel far sistemi. (Kaynak: ams OSRAM, 2023)

Benzer şekilde Nichia tarafından geliştirilen μ PLS teknolojisi, yaklaşık 16.380 MicroLED pikselin “mass-transfer” yöntemi ile ASIC sürücü üzerine entegre edilmesiyle oluşturulmaktadır. Bu sistemde kullanılan gelişmiş paketleme mimarisi, özellikle termal yönetim açısından önemli avantajlar sunmaktadır (Şekil 3).



Şekil 3. μ PLS MicroLED sistemi. (Kaynak: Infineon & Nichia, 2023)

MicroLED teknolojisi, sunduğu teknik avantajlar sayesinde otomotiv aydınlatmasında önemli yenilikleri beraberinde getirmektedir. Öncelikle, klasik matrix LED sistemlerine kıyasla çok daha yüksek çözünürlük sağlayarak daha keskin ve hassas ışık dağılımları elde edilmesini mümkün kılar. Ayrıca, yol üzerine sembol ve uyarı projeksiyonu yapılabilmesi, aydınlatma sistemlerinin yalnızca ışık üretimi değil aynı zamanda bilgi aktarımı amacıyla da kullanılabileceğini göstermektedir. Bunun yanı sıra, piksel bazlı karartma yeteneği sayesinde karşıdan gelen sürücülerin gözünü kamaştırmadan uzun far kullanımına imkân tanıyan glare-free (kamaşma önleyici) aydınlatma fonksiyonları geliştirilebilmektedir. MicroLED modüllerin kompakt yapısı ise tasarım esnekliği sağlarken, düşük güç tüketimi ve gelişmiş termal özellikleri sistem verimliliğine katkıda bulunmaktadır. Ayrıca, sürüş güvenliğini artıran dinamik ışık işaretlemeleri (örneğin yol kenarı uyarıları veya yönlendirme çizgileri) bu teknoloji ile mümkün hâle gelmektedir. Sonuç olarak MicroLED teknolojisi, opto-elektronik sürücü devreleri ve yazılım altyapısı ile tam entegre çalışarak “tam dijital far” konseptinin temelini

oluşturmaktadır. Bu yaklaşım, gelecekte araç aydınlatma sistemlerinin yalnızca pasif bir bileşen değil, aktif bir güvenlik ve iletişim platformu olarak konumlanacağını göstermektedir.

2.2 OLED (Organik LED) Aydınlatma: Homojen Yüzey Aydınlatması

Işık yayan diyot (LED) teknolojisi noktasal bir ışık kaynağı sunarken, organik ışık yayan diyot (OLED) teknolojisi yüzeyden ışık yayan bir yapı ile çalışmaktadır. Bu temel fark, OLED panellerin özellikle otomotiv arka aydınlatma sistemlerinde önemli bir yenilik olarak ortaya çıkmasını sağlamıştır. OLED yapısı, iki elektrot arasına yerleştirilen organik yarı iletken katmanlardan oluşmakta olup, bu katmanların kalınlığı genellikle nanometre seviyesindedir. Bu sayede oldukça ince ve homojen bir ışık yüzeyi elde edilebilmektedir. OLED teknolojisi, arka aydınlatma uygulamalarında (stop lambaları, sinyal lambaları ve park lambaları) sunduğu avantajlar ile öne çıkmaktadır. Yüzeysel ışık yayılımı sayesinde homojen bir aydınlatma sağlarken, ultra ince yapısı araç tasarımında önemli bir esneklik sunmaktadır. Ayrıca esnek panel seçenekleri sayesinde farklı geometrilere uyum sağlanabilmekte ve bu durum tasarımcıların marka kimliğini yansıtan özgün aydınlatma imzaları oluşturmaya olanak tanımaktadır. Bununla birlikte OLED sistemler, düşük enerji tüketimi ve çok bölgeli (segmentli) kontrol kabiliyeti ile fonksiyonel açıdan da önemli avantajlar sunmaktadır. Her bir segmentin bağımsız olarak kontrol edilebilmesi sayesinde animasyonlu sinyal fonksiyonları geliştirilebilmekte ve örneğin frenleme şiddetine bağlı olarak değişen ışık desenleri oluşturulabilmektedir. Ayrıca bu teknoloji, reflektör veya ek soğutucu gibi hacimli bileşenlere ihtiyaç duymadan 180 dereceye yakın homojen bir ışık dağılımı sağlayabilmektedir. Tüm bu özellikler, OLED teknolojisini özellikle estetik ve marka algısının ön planda olduğu üst segment araçlarda tercih edilen bir çözüm hâline getirmiştir. Bu bağlamda OLED tabanlı aydınlatma sistemleri, fonksiyonellik ile tasarım estetiğini bir araya getiren önemli bir teknoloji olarak konumlanmaktadır. OLED paneller, yüzeysel ışık yayılımı sayesinde homojen aydınlatma sağlayarak arka aydınlatma tasarımında önemli avantajlar sunmaktadır (Şekil 4).

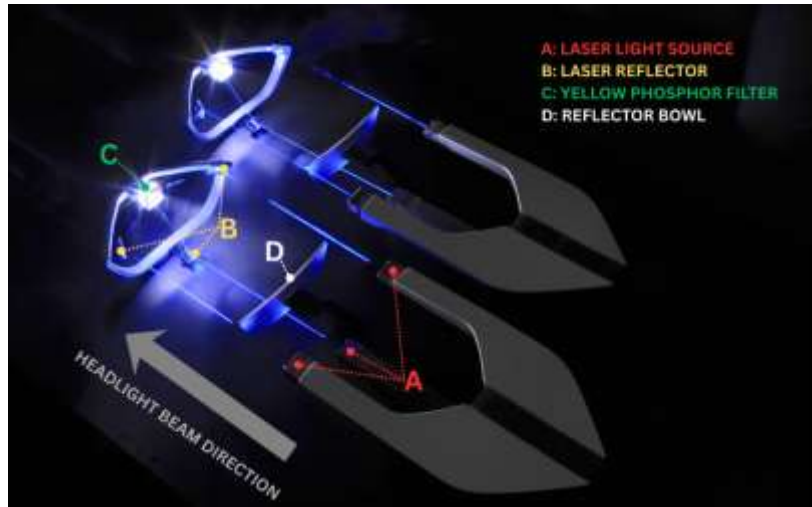


Şekil 4. Basit bir OLED panel yapısı. (Kaynak: LG Chem, 2015, <https://techxplore.com/news/2015-01-lg-chem-ups-radius-oled.html>)

2.3 Lazer Far Teknolojisi

Lazer diyotları, günümüzde en yüksek ışık yoğunluğuna sahip aydınlatma kaynakları arasında yer almaktadır. Ancak otomotiv uygulamalarında lazer ışını doğrudan yola yönlendirilmemekte, bunun yerine güvenli bir aydınlatma elde etmek amacıyla dolaylı bir dönüşüm mekanizması kullanılmaktadır.

Bu yaklaşım hem yüksek performansın korunmasını hem de insan gözü için güvenli bir ışık üretimini mümkün kılmaktadır. Lazer far sistemlerinin çalışma prensibi, mavi lazer ışınlarının genellikle galyum nitrür (GaN) tabanlı bir kaynaktan üretilerek sarı fosfor içeren bir dönüştürücüye yönlendirilmesine dayanmaktadır. Fosfor tabakası, lazerden gelen yüksek enerjili ışını absorbe ederek geniş spektrumlu, son derece parlak ve homojen bir beyaz ışığa dönüştürmektedir. Bu sayede lazerin yüksek enerji yoğunluğu, güvenli ve kullanılabilir bir aydınlatma formuna çevrilebilmektedir. Performans açısından değerlendirildiğinde, lazer far sistemleri geleneksel LED çözümlerine kıyasla önemli avantajlar sunmaktadır. Lazer tabanlı sistemler, çok daha küçük bir yüzey alanından ışık yayabilmekte, bu durum optik tasarımın kompaktlaşmasına ve ışığın uzun mesafelere daha etkin şekilde odaklanmasına olanak tanımaktadır. Nitekim bu sistemler, yaklaşık 600–700 metreye ulaşabilen aydınlatma menzilleri ile özellikle uzun far performansında öne çıkmaktadır. Bunun yanı sıra lazer farlar, yüksek ışık yoğunluğu, düşük enerji tüketimi ve dar açılı, hassas kontrol edilebilir ışık dağılımı gibi özellikleri sayesinde sürüş güvenliğine önemli katkılar sağlamaktadır. Özellikle otoyol sürüşlerinde uzun menzilli görüş imkânı sunarak sürücünün tepki süresini artırmakta ve potansiyel risklerin daha erken algılanmasına yardımcı olmaktadır. Gelişen sensör ve kontrol sistemleri ile birlikte, lazer tabanlı aydınlatma çözümlerinin gelecekte daha akıllı ve entegre sistemler hâline gelmesi beklenmektedir. Lazer far sistemleri, yüksek ışık yoğunluğu ve uzun menzil avantajı ile özellikle uzun far performansında önemli bir gelişim sunmaktadır (Şekil 5).

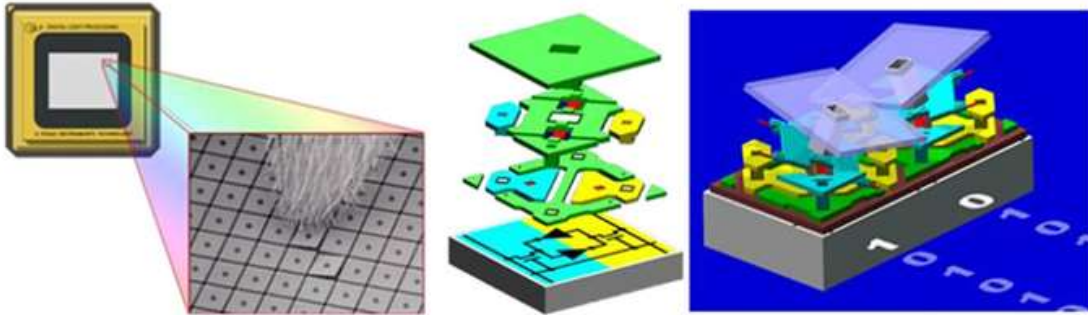


Şekil 5. Lazer far sisteminin çalışma prensibi. Mavi lazer kaynağından çıkan ışınların fosfor dönüştürücü üzerinden beyaz ışığa çevrilerek yola yönlendirilmesi gösterilmektedir. (Kaynak: BMW / MotorTrend, 2014)

2.4 Dijital Işık İşleme (DLP) ve HD Projeksiyon

Dijital ışık işleme (Digital Light Processing – DLP) teknolojisi, araç farlarını yalnızca aydınlatma sağlayan bir bileşen olmaktan çıkarak yüksek çözünürlüklü projeksiyon sistemlerine

dönüştürmektedir. Bu sistemlerin temelinde, Texas Instruments tarafından geliştirilen dijital mikro ayna cihazı (Digital Micromirror Device – DMD) yer almaktadır. DMD çipleri, çok sayıda mikroskobik aynadan oluşan yapıları sayesinde ışığın yönünü yüksek hızda kontrol edebilmekte ve bu sayede dinamik görüntü projeksiyonu mümkün hâle gelmektedir. Her bir far ünitesinde bir milyondan fazla mikro ayna bulunabilmekte ve bu aynalar ışığı saniyede binlerce kez yönlendirerek yol yüzeyine yüksek çözünürlüklü görüntüler yansıtmaktadır. Bu yüksek piksel yoğunluğu, aydınlatma sistemlerinin yalnızca ışık dağıtımını değil, aynı zamanda bilgi aktarımı amacıyla da kullanılabilmesini sağlamaktadır. DLP tabanlı sistemler, fonksiyonel açıdan sürüş güvenliğini destekleyen çeşitli uygulamalara imkân tanımaktadır. Örneğin dar yollarda aracın genişliğini gösteren kılavuz çizgilerin yola yansıtılması, yaya geçidi bulunmayan noktalarda yayalara yönelik uyarı projeksiyonları veya navigasyon verisi ile entegre çalışan yönlendirme işaretleri bu sistemlerin sunduğu gelişmiş özellikler arasında yer almaktadır. Bu sayede aydınlatma sistemleri, sürücüye aktif geri bildirim sağlayan bir arayüz hâline dönüşmektedir. Gelişen sensör teknolojileri ve araç içi haberleşme altyapısı ile birlikte değerlendirildiğinde, DLP tabanlı projeksiyon sistemleri gelecekte otonom sürüş senaryolarında önemli bir rol oynayacaktır. Bu sistemler, yalnızca sürücünün görüşünü artırmakla kalmayıp, çevredeki diğer yol kullanıcıları ile iletişim kurulmasına da olanak tanıyarak aydınlatmayı çok boyutlu bir güvenlik bileşeni hâline getirmektedir. DLP tabanlı sistemler, yüksek çözünürlüklü projeksiyon kabiliyeti sayesinde yol üzerine bilgi yansıtılmasını mümkün kılmaktadır (Şekil 6).



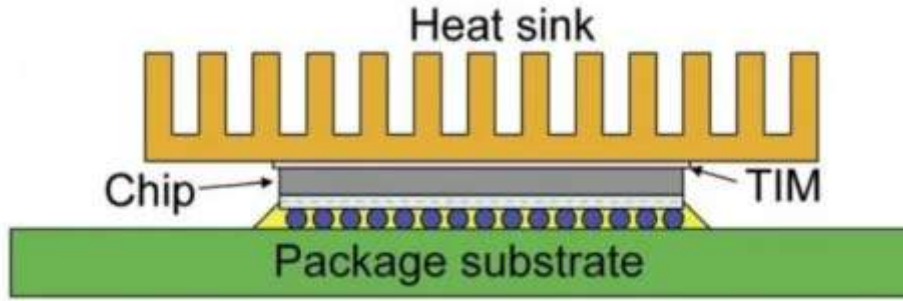
Şekil 6. Dijital mikro ayna cihazı (DMD) yapısı. Mikroskobik aynaların yön değiştirmesi ile ışığın kontrollü biçimde yansıtılması ve yüksek çözünürlüklü projeksiyon elde edilmesi gösterilmektedir.

(Kaynak: Texas Instruments / ResearchGate, 2016)

3. Termal Yönetim ve Güvenilirlik

Otomotiv aydınlatma sistemlerinde, özellikle yüksek güç yoğunluğuna sahip LED ve MicroLED modüllerinde termal yönetim kritik bir tasarım parametresi olarak öne çıkmaktadır. Bu sistemlerde ısı enerji, çipten başlayarak alt taşıyıcıya, ardından termal ara malzemeye (Thermal Interface Material – TIM), ısı yayıcı bileşenlere ve son olarak konveksiyon ve iletim yoluyla ortam havasına aktarılmaktadır. Bu ısı yol boyunca toplam termal direncin minimize edilmesi, akım derating (akım düşürme) ihtiyacını azaltarak sistem performansının korunmasına katkı sağlamaktadır. Termal performansı artırmak amacıyla, modül içerisinde farklı malzeme ve soğutma çözümleri bir arada kullanılmaktadır. Alüminyum ve alüminyum kompozit yapılar, bakır insertler, vapor chamber (buhar odası) yapıları ve ısı boruları gibi teknolojiler, ısıнын modül içinde daha homojen dağılmasını sağlayarak sıcak nokta

oluşumunu engellemektedir. Bu sayede hem optik performans hem de komponent ömrü olumlu yönde etkilenmektedir. Bununla birlikte, otomotiv aydınlatma sistemlerinde güvenilirlik yalnızca termal performans ile sınırlı değildir. Tasarım sürecinde gerçekleştirilen doğrulama analizleri, çevresel testler ve elektromanyetik uyumluluk (EMC) gereksinimleri, sistemin çalışma koşulları altında kararlı performans göstermesini garanti altına almaktadır. Ayrıca ISO 26262 işlevsel güvenlik standardı kapsamında yapılan değerlendirmeler, özellikle güvenlik açısından kritik fonksiyonlara sahip aydınlatma sistemlerinin hatalara karşı dayanıklılığını artırmayı hedeflemektedir. Aydınlatma modüllerinde ısı enerji yönetimi, sistem performansının sürdürülebilirliği açısından kritik bir rol oynamaktadır (Şekil 7).



Şekil 7. Bir yarı iletken çip için ısı iletim yolu ve termal yönetim elemanları. Çipten başlayarak termal ara malzeme (TIM), alt taşıyıcı ve ısı yayıcı bileşenler üzerinden ısı ortam ortamına iletilmesi gösterilmektedir. (Kaynak: Indium Corporation, 2020)

4. Sürücü Elektronik ve Yazılım

Modern otomotiv aydınlatma sistemlerinde sürücü elektronik ve yazılım katmanı, sistem performansının belirlenmesinde kritik bir rol oynamaktadır. Işık şiddeti ve parlaklık kontrolü genellikle doğrudan akım sürüşü ve yüksek frekanslı darbe genişlik modülasyonu (PWM) yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Bu sayede geniş bir dinamik aralık elde edilmekte, titreşim (flicker) etkisi minimize edilmekte ve renk kararlılığı sağlanmaktadır. Bununla birlikte, güncel aydınlatma sistemleri yalnızca güç elektronik ile sınırlı kalmayıp, araç içi haberleşme ağlarına da entegre çalışmaktadır. LIN, CAN ve Ethernet gibi iletişim protokolleri üzerinden sistem durumu sürekli izlenebilmekte, arıza tespiti yapılabilmekte ve uzaktan yazılım güncellemeleri (Over-The-Air – OTA) aracılığıyla sistem performansı geliştirilebilmektedir. Bu yapı, özellikle piksel tabanlı aydınlatma sistemlerinde ışık haritalarının sahada optimize edilmesine olanak tanımaktadır. Artan sistem karmaşıklığı ile birlikte siber güvenlik de aydınlatma sistemlerinde önemli bir gereksinim hâline gelmiştir. Aydınlatma modülleri, araç içi ağı bir parçası olarak çalıştığından, yetkisiz erişimlerin önlenmesi için kimlik doğrulama ve yetkilendirme mekanizmalarının uygulanması kritik önem taşımaktadır. Bu kapsamda geliştirilen güvenlik çözümleri hem sistem bütünlüğünün korunmasını hem de araç güvenliğinin üst düzeyde tutulmasını sağlamaktadır.

5. Enerji Verimliliği ve e-Mobilité Etkisi

Otomotiv aydınlatma sistemlerinde enerji verimliliği, özellikle elektrikli araçların yaygınlaşmasıyla birlikte daha kritik bir tasarım parametresi hâline gelmiştir. Bir aydınlatma sisteminin toplam verimi;

ışık kaynağı verimi, optik kayıplar, sürücü elektroniği kayıpları ve termal derating etkilerinin birleşimi ile belirlenmektedir. Bu nedenle sistem tasarımında her bir kayıp mekanizmasının minimize edilmesi büyük önem taşımaktadır. Akıllı dimleme stratejileri ve adaptif ışık dağılımı yaklaşımları, yalnızca gerekli bölgelerin aydınlatılmasını sağlayarak gereksiz enerji tüketimini azaltmaktadır. Bu durum, özellikle sürekli değişen sürüş koşullarında sistemin enerji kullanımını optimize etmek açısından önemli bir avantaj sunmaktadır. Elektrikli araçlar özelinde değerlendirildiğinde ise aydınlatma yükünün azaltılması, özellikle düşük sıcaklık koşullarında batarya performansının korunmasına ve araç menzilin artırılmasına katkı sağlamaktadır. Böylece aydınlatma sistemleri, araç enerji bütçesinin daha öngörülebilir ve verimli şekilde yönetilmesine destek olmaktadır.

6. Tasarım Perspektifi ve Kullanıcı Deneyimi

Modern otomotiv aydınlatma sistemleri, yalnızca fonksiyonel bir gereklilik olmanın ötesine geçerek araç tasarımının ayrılmaz bir parçası hâline gelmiştir. İnce modül yapıları, ışık kılavuzu (light-guide) geometrileri ve şeffaf veya yarı şeffaf difüzör çözümleri, araçların ön ve arka tasarımında özgün marka imzalarının oluşturulmasına olanak tanımaktadır. Bu sayede aydınlatma sistemleri, markaların görsel kimliğini yansıtan önemli bir tasarım unsuru olarak konumlanmaktadır. Üretilbilirlik açısından bakıldığında, modüler tasarım yaklaşımları ve değiştirilebilir alt bileşenler üretim maliyetlerini düşürmekte ve servis süreçlerini kolaylaştırmaktadır. Otomasyon dostu montaj çözümleri ise üretim hatlarında verimliliğin artırılmasına katkı sağlamaktadır. Kullanıcı deneyimi perspektifinden değerlendirildiğinde ise dinamik karşılama ve uğurlama senaryoları, animasyonlu arka aydınlatma imzaları ve bağlamsal ışık projeksiyonları, aracın algılanan kalite seviyesini artırmaktadır. Bu tür etkileşimli aydınlatma fonksiyonları, kullanıcı ile araç arasında duygusal bir bağ kurulmasına katkı sağlayarak markanın değer algısını güçlendirmektedir.

7. Gelecek Yönelimleri

Otomotiv aydınlatma teknolojilerinin geleceği, dijitalleşme, yazılım entegrasyonu ve haberleşme kabiliyetlerinin gelişimi ile şekillenmektedir. MicroLED ve uygulamaya özel entegre devre (ASIC) teknolojilerinin birleşimi, tamamen yazılım tanımlı ve yüksek çözünürlüklü “tam dijital far” konseptini mümkün kılmaktadır. Bu sistemler, yol ve çevreye dair bilgilerin gerçek zamanlı olarak ışık aracılığıyla ifade edilmesine olanak tanımaktadır. Araçtan araca (V2V) ve araçtan yayaya (V2P) iletişim sistemlerinin gelişmesiyle birlikte, aydınlatma sistemleri de aktif bir iletişim aracı hâline gelmektedir. Işık tabanlı uyarılar, trafik güvenliğini artıran yeni bir kooperatif güvenlik katmanının oluşmasına katkı sağlamaktadır. Bunun yanı sıra, yüksek ısı yoğunluklarına uygun kompozit ısı yayıcı malzemeler, gelişmiş termal arayüz malzemeleri (TIM) ve simülasyon tabanlı optimizasyon yöntemleri, geleceğin aydınlatma sistemlerinde öne çıkan mühendislik alanları arasında yer almaktadır. Aynı zamanda dijital projeksiyon ve dinamik aydınlatma fonksiyonlarına yönelik regülasyonların küresel ölçekte standartlaşması beklenmektedir.

SONUÇ VE TARTIŞMA

Opto-elektronik tabanlı otomotiv aydınlatma sistemleri, son yıllarda önemli bir dönüşüm geçirerek daha akıllı, verimli ve güvenli çözümler sunan kompleks sistemler hâline gelmiştir. LED teknolojisinin olgunlaşması ile birlikte MicroLED tabanlı yüksek çözünürlüklü aydınlatma sistemleri yeni bir standart oluştururken, OLED teknolojisi tasarım özgürlüğünü artırmakta ve lazer far sistemleri uzun menzilli aydınlatma performansı ile öne çıkmaktadır. Gelecek perspektifinde, tamamen dijital, sensör entegrasyonuna sahip ve yazılım kontrollü aydınlatma sistemlerinin yaygınlaşacağı öngörülmektedir. Bu sistemler, yalnızca sürüş güvenliğini artırmakla kalmayıp, aynı zamanda yol kullanıcıları ile dinamik bir iletişim kurulmasını sağlayarak otonom ve bağlantılı araç ekosisteminin temel bileşenlerinden biri hâline gelecektir. Bu bağlamda otomotiv aydınlatması, pasif bir aydınlatma bileşeninden aktif bir güvenlik ve bilgi aktarım platformuna dönüşmektedir.

KAYNAKÇA

- EngineeringMix. (2025). LED and OLED: The future of automotive lighting.
- IEEE. (n.d.). Optoelectronic technologies for automotive lighting: State-of-the-art. IEEE Xplore.
- Infineon, & Nichia. (2023). 16,384 LEDs to revolutionize automotive lighting: High-definition micro LED matrix solution.
- NumberAnalytics. (2025). The future of automotive lighting: Emerging trends and technologies.
- Semiconductor Today. (2025). Micro LED solutions boost resolution over traditional matrix LEDs.
- Yole Group. (2025). MicroLEDs: Enhancing automotive headlights.

Kolon Tip Elektrik Destekli Direksiyon (C-EPS) Sistemlerinin Analizi

Dr. Birtan GÜLER

birtan.guler@tofas.com.tr; TOFAŞ Türk Otomobil Fabrikası A.Ş. Ar-Ge Merkezi, Bursa/Türkiye.

Özet

Elektrik destekli direksiyon (Electric Power Steering, EPS) sistemleri, hidrolik direksiyon sistemlerine kıyasla daha yüksek enerji verimliliği, azaltılmış bakım gereksinimi ve gelişmiş kontrol esnekliği sunarak modern otomotiv sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada, Column tipi elektrik destekli direksiyon (C-EPS) sistemlerinin yapısal konfigürasyonu, çalışma prensibi, matematiksel modellenmesi ve kontrol stratejileri sistematik bir yaklaşımla incelenmiştir. Sistem; tork sensörü, elektronik kontrol ünitesi (ECU) ve elektrik motoru bileşenlerinden oluşmakta olup, sürücü torku ve araç hızı girdilerine bağlı olarak değişken destek torku üretmektedir. Çalışma kapsamında, direksiyon sisteminin dinamik davranışı ikinci dereceden diferansiyel denklemler ile modellenmiş ve hız bağımlı kazanç fonksiyonu kullanılarak destek torkunun ayarlanması sağlanmış ve sistem performansı bu parametre üzerinden değerlendirilmiştir. Bu çalışma, C-EPS sistemlerinin tasarım ve kontrolüne yönelik bütüncül bir değerlendirme sunarak literatüre katkı sağlamayı amaçlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Direksiyon, EPS, Kolon tipi

Abstract

Electric Power Steering (EPS) systems are widely utilized in modern automotive applications due to their superior energy efficiency, reduced maintenance requirements, and enhanced control flexibility compared to conventional hydraulic steering systems. In this study, the structural configuration, operating principles, mathematical modeling, and control strategies of Column-type Electric Power Steering (C-EPS) systems are systematically investigated. The system consists of a torque sensor, an Electronic Control Unit (ECU), and an electric motor, and generates variable assist torque based on driver torque input and vehicle speed signals. Within the scope of this study, the dynamic behavior of the steering system was modeled using second-order differential equations, and the assist torque was regulated through a speed-dependent gain function. System performance was evaluated with respect to this parameter. This study aims to contribute to the literature by providing a comprehensive evaluation of the design and control of C-EPS systems.

Keywords: Steering, EPS, Column-type

GİRİŞ

Direksiyon sistemleri, taşıt dinamiği, sürüş konforu ve aktif güvenlik açısından kritik öneme sahip temel otomotiv alt sistemlerinden biridir. Geleneksel hidrolik direksiyon sistemleri, sürekli çalışan pompa yapısı nedeniyle enerji kayıplarına yol açmakta ve bakım gereksinimlerini artırmaktadır. Bu

durum, otomotiv endüstrisinde daha verimli ve kontrol edilebilir sistemlere olan ihtiyacı artırmış ve elektrik destekli direksiyon (Electric Power Steering, EPS) sistemlerinin geliştirilmesini teşvik etmiştir.

EPS sistemleri, yalnızca ihtiyaç duyulduğunda devreye giren elektrik motoru sayesinde enerji tüketimini minimize etmekte ve gelişmiş kontrol algoritmaları ile sürüş konforunu artırmaktadır. Bu sistemler genel olarak kolon tipi (C-EPS), pinyon tipi (P-EPS) ve rack tipi (R-EPS) olmak üzere üç ana kategori altında sınıflandırılmaktadır (Autozine, n.d.).

Column Electric Power Steering (C-EPS), elektrik motorunun direksiyon kolonuna entegre edildiği bir mimari olup, kompakt yapısı, düşük maliyeti ve kolay entegrasyon avantajları nedeniyle özellikle küçük ve orta segment araçlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Kolon tipi EPS, seri üretimde ilk olarak 1988 yılında bir Suzuki Cervo modelinde kullanılmıştır (JTEKT Corporation, n.d.). Başlangıçta yalnızca düşük direksiyon kuvvetine sahip mini ve kompakt araçlarda uygulanabilen bu sistem, malzeme teknolojilerindeki gelişmeler ve daha yüksek tork kapasitesine sahip bileşenlerin geliştirilmesi sayesinde günümüzde orta sınıf araçlarda da kullanılabilir hale gelmiştir. Ayrıca, sistemin yaklaşık -40 °C ile 85 °C arasındaki geniş sıcaklık aralığında çalışabilmesi, otomotiv uygulamaları açısından önemli bir avantaj sağlamaktadır.

C-EPS sistemlerinde elektrik motorundan elde edilen tork, genellikle sonsuz vida (worm gear) mekanizması aracılığıyla direksiyon kutusuna aktarılmaktadır. Bu mekanizma, kendinden kilitlemeli olmayan bir yapı sergilemekte olup, vida elektrik motoru miline bağlıdır ve karşılık gelen dişli direksiyon mekanizması ile etkileşim halindedir. Bu yapı, mekanik direksiyon sistemi ile birlikte çalışarak sürücü girişine destek sağlamaktadır.

EPS sistem performansı büyük ölçüde kullanılan kontrol algoritmalarına bağlıdır. Özellikle hız bağımlı kazanç fonksiyonu $K(v)$, direksiyon destek karakteristiğini belirleyen temel parametrelerden biridir. Literatürde, PI tabanlı kontrol, adaptif kontrol ve bulanık mantık yöntemleri gibi çeşitli kontrol stratejileri önerilmiştir (Gupta et al., 2016), (He & Gu, 2012). Bunun yanı sıra, modern EPS sistemleri gelişmiş sürücü destek sistemleri (ADAS) ile entegre çalışmakta olup, bu durum sistemin gerçek zamanlı veri işleme, haberleşme ve fonksiyonel güvenlik gereksinimlerini daha kritik hale getirmektedir. Bu kapsamda, EPS sistemlerinin ISO 26262 standardına uygun olarak tasarlanması gerekmektedir (International Organization for Standardization [ISO 26262], 2018)

Bu çalışmada, Column tipi elektrik destekli direksiyon sistemleri; yapısal özellikleri, matematiksel modellenmesi, kontrol stratejileri ve sistem entegrasyonu açısından bütüncül bir yaklaşımla incelenmiştir. Çalışma, C-EPS sistemlerinin performansını etkileyen temel parametrelerin analiz edilmesi ve sistem tasarımına yönelik kapsamlı bir değerlendirme sunmayı amaçlamaktadır. Buna ek olarak, günümüzde elektrikli ve otonom araç teknolojilerinin gelişmesiyle birlikte EPS sistemlerinin önemi daha da artmıştır. Özellikle şerit takip asistanı, otomatik park sistemi ve otonom sürüş fonksiyonları gibi ileri sürücü destek sistemlerinde (ADAS), direksiyon sisteminin hassas, hızlı ve güvenilir şekilde kontrol edilebilmesi kritik bir gereklilik haline gelmiştir. Bu nedenle C-EPS sistemlerinde yalnızca mekanik ve kontrol performansı değil; haberleşme altyapısı, sensör doğruluğu, arıza toleransı ve siber güvenlik gibi unsurlar da önemli tasarım kriterleri arasında yer almaktadır. Ayrıca düşük enerji tüketimi, hafif yapı ve yüksek verimlilik avantajları sayesinde C-EPS sistemleri,

sürdürülebilir mobilite ve karbon emisyonlarının azaltılması hedeflerine de katkı sağlamaktadır. Kolon tip EPS yapısı Şekil.1 de görülmektedir.



Şekil 1. Kolon tipi EPS ve mekanik direksiyon kutusu birleşimi (Harrer & Pfeffer, 2017).

YÖNTEM

2.1 Sistem Yapısı

C-EPS sistemi, mekanik ve elektronik bileşenlerin entegrasyonundan oluşmaktadır. Temel bileşenler aşağıda verilmiştir:

- Direksiyon kolunu ve torsiyon çubuğu
- Tork sensörü (genellikle çift kanallı yapı)
- Elektrik motoru (BLDC veya PMSM)
- Redüksiyon mekanizması (worm gear)
- Elektronik kontrol ünitesi (ECU)

Sistem, sürücü tarafından uygulanan torku algılayarak buna karşılık gelen yardımcı torku üretmek üzere tasarlanmıştır.

2.2 Matematiksel Modelleme

Direksiyon sisteminin dinamik davranışı aşağıdaki ikinci dereceden diferansiyel denklem ile ifade edilebilir:

$$J\ddot{\theta} + B\dot{\theta} + K\theta = T_d + T_m - T_{road}$$

Burada J , B ve K sırasıyla sistemin atalet, sönüm ve rijitlik parametrelerini temsil etmektedir. T_d sürücü torkunu, T_m motor tarafından üretilen destek torkunu ve T_{road} yol kaynaklı geri besleme kuvvetini ifade etmektedir.

Destek torku, araç hızına bağlı olarak aşağıdaki şekilde modellenmektedir:

$$T_{assist} = K(v) \cdot T_{driver}$$

Bu ifade, düşük hızlarda yüksek, yüksek hızlarda düşük destek sağlanmasını mümkün kılmaktadır.

2.3 Kontrol Yöntemi

C-EPS sisteminde kapalı çevrim kontrol yapısı kullanılmaktadır. Kontrol mimarisi aşağıdaki temel bileşenlerden oluşmaktadır:

- Assist Map (Kazanç Haritası): Araç hızına bağlı olarak destek katsayısını belirler
- PI Kontrolcü: Referans tork ile gerçek tork arasındaki hatayı minimize eder
- Akım Tabanlı Motor Kontrolü: Motor torkunun hassas kontrolünü sağlar

PI kontrolcü aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$T_m = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt$$

Burada $e(t)$, hedef ve ölçülen tork arasındaki farkı temsil etmektedir.

2.4 Haberleşme Altyapısı

C-EPS sistemi, araç içi kontrol birimleri ile veri alışverişini Controller Area Network (CAN) protokolü üzerinden gerçekleştirmektedir. Araç hızı, motor durumu ve direksiyon açısı gibi veriler gerçek zamanlı olarak işlenmektedir

2.5 Güvenlik ve Tanılama

Sistem tasarımında fonksiyonel güvenlik kritik bir rol oynamaktadır. Bu kapsamda:

- Çift kanallı tork sensörü kullanımı
- Sensör tutarlılık (plausibility) kontrolleri
- Aşırı akım ve sıcaklık koruması
- Arıza durumunda destek torkunun devre dışı bırakılması

gibi mekanizmalar uygulanmaktadır. Bu yapı, otomotiv güvenlik standartlarına uyum sağlamayı hedeflemektedir.

BULGULAR

C-EPS sisteminin analizi, sistemin hız duyarlı destek karakteristiği sayesinde düşük hızlarda sürüş konforunu artırdığını ve yüksek hızlarda araç stabilitesini koruduğunu göstermektedir. Elektrik motorunun yalnızca ihtiyaç anında devreye girmesi, sistemin enerji verimliliğini önemli ölçüde artırmaktadır.

Bununla birlikte, motorun direksiyon koluna konumlandırılması nedeniyle elde edilebilen maksimum tork sınırlıdır. Bu durum, sistemin ağır araçlarda kullanımını kısıtlamaktadır. Ayrıca, direksiyon geri bildiriminin yazılım ile oluşturulması, doğal direksiyon hissinin elde edilmesini zorlaştırabilmektedir.

SONUÇ VE TARTIŞMA

Column tipi elektrik destekli direksiyon sistemleri, otomotiv sektöründe enerji verimliliği ve maliyet avantajları nedeniyle yaygın olarak tercih edilmektedir. Sistem performansı büyük ölçüde kontrol algoritmalarına ve parametre ayarlarına bağlıdır. Gelecekte, gelişmiş kontrol teknikleri ve yazılım tabanlı optimizasyon yöntemleri ile daha yüksek performans ve sürüş konforu elde edilmesi mümkün olacaktır. Özellikle sensör doğruluğu, haberleşme altyapısı, fonksiyonel güvenlik ve gerçek zamanlı kontrol kabiliyeti gibi parametreler, gelecekteki EPS tasarımlarında kritik rol oynayacaktır. Bu nedenle, ilerleyen çalışmalarda daha gelişmiş motor yapıları, adaptif kontrol yöntemleri ve yapay zekâ tabanlı algoritmalar kullanılarak sistem güvenilirliği, direksiyon hissi ve sürüş stabilitesinin daha da iyileştirilmesi hedeflenmelidir.

KAYNAKÇA

Autozine. (t.y.). *Electric Power Steering Technical Overview*. Erişim adresi:

https://www.autozine.org/technical_school/traction/Steering_1.html

JTEKT Corporation. (t.y.). *History of EPS Development*. Erişim adresi:

<https://www.jtekt.com.cn/en/aboutus/history/index.html>

Gupta, A., et al. “Mathematical Modeling of EPS System.” *International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology (IJARSET)*, Vol. 3, Issue 9, 2016.

He, Z., & Gu, M. “Dynamic Research on Control Strategy of Electric Power Steering System.” *SAE Technical Paper 2012-01-0212*, SAE International, 2012.

International Organization for Standardization. (2018). *ISO 26262: Road vehicles – Functional safety*. Geneva, Switzerland: ISO.

Harrer, M., & Pfeffer, P. (Eds.). (2017). *Steering handbook*. Cham, Switzerland: Springer.

Araçlarda Lastik Kaynaklı Kalite Algısı Üzerine Yol Yüzeylerinin ve Test Koşullarının Etkisi: Chip & Chunk Aşınma Mekanizması Üzerine Bir Çalışma

Barış ULUÇAY¹, Berkay CEDETAS²

¹baris.ulucay@tofas.com.tr; Tofaş Türk Otomobil Fabrikası A.Ş. Ar-Ge Merkezi, Bursa / Türkiye.

²berkay.cedetas@tofas.com.tr; Tofaş Türk Otomobil Fabrikası A.Ş. Ar-Ge Merkezi, İstanbul/ Türkiye.

Özet

Değişken çalışma koşulları altında lastik performansının tahmin edilmesi, çok sayıda etkileyen parametre nedeniyle hâlen karmaşık bir mühendislik problemidir. Kuru, ıslak ve karlı zemin tutuşu gibi güvenlik odaklı performans kriterleri kritik önem taşırken, lastik sırt bütünlüğünün kullanım ömrü boyunca korunması da aynı derecede önemlidir. Ancak gerçek kullanım koşullarında lastik performansı zamanla bozulmaktadır. Bu çalışma, hafif ticari araç lastiklerinde önemli bir aşınma mekanizması olan Chip & Chunk oluşumuna odaklanmaktadır. Farklı lastik markaları, modelleri ve sırt desenleri; çeşitli yol yüzeyleri ve test koşulları altında karşılaştırmalı olarak incelenmiş, bu hasar mekanizmasının başlangıcı ve ilerleyişi değerlendirilmiştir. Aşınmış lastikler üzerinde elde edilen deneysel sonuçlar; yol pürüzlülüğü, sıcaklık, yük ve sürüş davranışı gibi temel etkileyici faktörleri ele alan literatür çalışması ile desteklenmiştir. Bulgular, Chip & Chunk hasarının yalnızca görsel bir kusur olmaktan çıkıp güvenliği ve otomobil üreticilerinin algılanan kalite performansını etkileyen kritik bir performans bozulma mekanizmasına dönüştüğünü göstermektedir. Çalışma ayrıca standartlaştırılmış test koşulları ile gerçek kullanım koşulları arasındaki farkı ortaya koymakta ve Chip & Chunk performansının otomobil üreticilerinin doğrulama süreçleri ile RFQ/CTS gereksinimlerine entegre edilmesini önermektedir.

Anahtar Kelimeler: Aşınma Mekanizmaları, Chip & Chunk, Doğrulama, Hafif Ticari Araçlar, Lastik Aşınması, Lastik Performansı, Yol Yüzeyi Etkileri

Abstract

Predicting tire performance under varying operating conditions remains a complex challenge due to multiple influencing parameters. While safety-related performances such as dry, wet, and snow grip are critical, maintaining sirt integrity throughout the tire lifecycle is equally important. However, tire performance degrades under real-world conditions. This study focuses on Chip & Chunk formation as a key wear mechanism in light commercial vehicle tires. A comparative analysis is conducted across different tire brands, models, and sirt patterns under various road surfaces and test conditions to evaluate the initiation and progression of this damage mechanism. Experimental results on worn tires are supported by a literature review addressing key influencing factors such as road roughness, temperature, load, and driving behavior. Findings indicate that Chip & Chunk evolves from a visual defect into a critical performance degradation mechanism affecting safety and perceived OEM

quality. The study highlights the gap between standardized test conditions and real-world usage and proposes integrating Chip & Chunk performance into OEM validation and RFQ/CTS processes.

Keywords: Wear Mechanisms, Chip & Chunk, Validation, Light Commercial Vehicles, Tire Wear, Tire Performance, Road Surface Effects

GİRİŞ

Hafif ticari araçlarda (Light Commercial Vehicles, LCV) lastik performansı; güvenlik, dayanıklılık ve operasyonel verimlilik açısından kritik bir rol oynamaktadır. Bu araçlar, binek araçlara kıyasla daha yüksek yük değişkenliği, uzun çalışma süreleri ve farklı yol koşullarına maruz kalmaları nedeniyle lastik performans sürekliliğine daha fazla bağımlıdır. Özellikle şehir içi dağıtım, uzun yol taşımacılığı ve şantiye kullanımları gibi farklı operasyonel senaryolar, lastiklerin hem mekanik hem de termal olarak zorlanmasına neden olmaktadır.

Lastik performansı genellikle kuru, ıslak ve karlı zemin tutuşu gibi güvenlik odaklı kriterler üzerinden değerlendirilmektedir. Bununla birlikte, lastik sırtının kullanım ömrü boyunca bütünlüğünü koruması, performans sürekliliği açısından en az bu kriterler kadar önemlidir. Gerçek kullanım koşullarında lastik performansı zamanla azalmakta ve bu azalma büyük ölçüde aşınma mekanizmalarına bağlı olarak gelişmektedir.

Aşınma yalnızca diş derinliğinin azalması olarak değerlendirilmemelidir. Aşınma şekli ve tipi, lastiğin yol ile temas karakteristiğini doğrudan etkileyerek fren performansı, yol tutuşu, gürültü seviyesi ve sürüş stabilitesi üzerinde belirleyici rol oynamaktadır. Bu bağlamda, özellikle hafif ticari araçlarda sıkça gözlemlenen Chip & Chunk gibi lokal hasar mekanizmaları, klasik aşınma değerlendirme yöntemlerinin ötesinde ele alınmalıdır.

Lastik aşınması; yol yüzeyi karakteristiği, sıcaklık, yük dağılımı, kayma oranı ve sırt karışım özelliklerinin birlikte etkilediği kompleks bir tribolojik süreç olarak tanımlanmaktadır. Özellikle hafif ticari araçlarda yüksek yük kapasitesi ve agresif kullanım koşulları nedeniyle sırt bölgesinde oluşan lokal gerilimler aşınma davranışını doğrudan etkilemektedir.

Gent ve Walter (2006), pnömatik lastiklerde sırt bölgesinde meydana gelen gerilim dağılımlarının yalnızca diş aşınmasını değil, aynı zamanda lokal kauçuk kopmaları ve yüzey bozulmalarını da etkilediğini belirtmiştir. Benzer şekilde Persson (2000), yol pürüzlülüğünün mikro ölçekte temas basıncı

dağılımını değiştirdiğini ve agresif yüzey karakteristiğine sahip yol koşullarında sırt bölgesindeki lokal deformasyonları artırdığını ifade etmiştir.

Williams (2005), sırt aşınmasının yalnızca malzeme kaybı olarak değerlendirilmemesi gerektiğini; sürtünme, enerji dağılımı ve lokal sıcaklık oluşumlarının sırt hasar mekanizmaları üzerinde kritik rol oynadığını belirtmiştir.

Ayrıca literatürde stabilize yol, kaba asfalt ve taşlı yüzey koşullarının sırt bloklarında lokal kesme gerilmelerini artırdığı ve Chip & Chunk benzeri hasar mekanizmalarını hızlandırdığı belirtilmektedir (Gent & Walter, 2006; Persson, 2000).

Gerçek kullanım koşullarının standart laboratuvar validasyon çevrimlerinden önemli ölçüde farklılık gösterebildiği ve özellikle hafif ticari araç lastiklerinde saha testlerinin kritik öneme sahip olduğu vurgulanmaktadır. Bu nedenle gerçek yol koşullarını temsil eden saha çevrimlerinin OEM doğrulama süreçlerine entegre edilmesi önerilmektedir.

Bu çalışmanın amacı, hafif ticari araç lastiklerinde farklı aşınma tiplerinin performans üzerindeki etkilerini incelemek ve özellikle Chip & Chunk oluşumunun gerçek kullanım koşullarındaki rolünü değerlendirmektir.

YÖNTEM

Lastik aşınması; temas mekaniği, malzeme özellikleri ve çalışma koşullarının etkileşimi sonucu ortaya çıkan kompleks bir süreçtir. Literatürde aşınma mekanizmaları genel olarak abrasif, adeziv, yorulma kaynaklı ve kesilme/kopma (cut & chip) aşınmaları olarak sınıflandırılmaktadır.

Hafif ticari araç lastiklerinde yük, sıcaklık, yol pürüzlülüğü ve sürüş karakteristiği aşınma davranışını doğrudan etkileyen temel parametrelerdir. Artan yük ve yüksek çalışma sıcaklığı temas basıncı ile ısı oluşumunu artırırken, agresif sürüş koşulları lokal gerilim yoğunlaşmalarını hızlandırarak düzensiz aşınma oluşumuna neden olmaktadır.

Bu aşınma tiplerinden biri olan chunking ve chipping, özellikle taşlı ve pürüzlü yol koşullarında sırt kauçuğundan parça kopması şeklinde ortaya çıkan önemli bir hasar mekanizmasıdır.

Chipping küçük kauçuk parçacıklarının yüzeyden ayrılmasıyla karakterize edilirken, chunking daha büyük sırt bloklarının kopması şeklinde gelişmektedir. Bu hasarın oluşumu; sırt karışım yırtılma dayanımı, histerezis davranışı, desen rijitliği, blok deformasyonu, temas basıncı dağılımı ve çalışma sıcaklığı gibi parametrelerle doğrudan ilişkilidir.

Düşük şişirme basıncı, aşırı yükleme, yüksek slip oranı ve taşlı zemin kullanımı sırt bölgesindeki kesme kuvvetlerini artırarak çatlak başlangıcını ve ilerlemesini hızlandırmaktadır. Ayrıca yüksek çalışma sıcaklığı kauçuğun mekanik dayanımını azaltarak crack propagation davranışını artırmakta ve chunking/chipping hasarının kritik seviyeye ulaşmasına neden olmaktadır.

Bu nedenle sırt desen geometrisi, yapısal tasarım ve karışım özelliklerinin birlikte optimize edilmesi, lastik dayanımı ve aşınma performansı açısından kritik önem taşımaktadır.

Bununla birlikte mevcut standart test yöntemleri genellikle kontrollü ve tekrarlanabilir koşullara odaklanmakta olup, gerçek yol koşullarında karşılaşılan aşınma türlerini tam olarak temsil edememektedir. Bu durum, özellikle hafif ticari araç segmentinde görülen Chip & Chunk gibi hasarların değerlendirilmesinde önemli bir boşluk oluşturmaktadır.

Bu nedenle literatürde giderek artan sayıda çalışma, gerçek kullanım koşullarını temsil eden test metodolojilerinin geliştirilmesi ve aşınma temelli performans kriterlerinin OEM doğrulama süreçlerine entegre edilmesi gerekliliğini vurgulamaktadır. Çalışma kapsamında farklı markalara ait 215/65R16 ve 215 /60 R17 ölçüsündeki hafif ticari araç lastikleri kullanılmıştır.

Çalışma kapsamında farklı üreticilere ait seri üretim ve aday lastikler kullanılmıştır. Test edilen lastiklerin teknik özellikleri ve sırt desen geometrileri Şekil 1’de verilmiştir. Lastikler benzer kullanım segmentinde seçilmiş olup sırt desen yapılarının farklı yol koşulları altında Chip & Chunk oluşumuna etkisi karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

	Seri 1 (Marka A)	Seri 2 (Marka B)	Test Lastiği 1 (Marka C)	Test Lastiği 2 (Marka C)
Kullanım Tipi	Yaz	Yaz	Yaz	Yaz
Ebat	215/60 R17C 104/102H	215/65 R16C 104/102H	215/60 R17C 104/102H	215/65 R16C 104/102H
Yuvarlanma Direnci Sınıfı (RR Class)	B	A	A	A
Sırt Deseni				
	Lastik 1	Lastik 2	Lastik 3	Lastik 4

Şekil 1. Çalışmada kullanılan referans ve aday lastiklerin teknik özellikleri ile sırt desen geometrileri.

2.1. Test Koşulları

Testler boyunca lastik basınçları ön aks için 2,8 bar, arka aks için ise 3,0 bar olarak korunmuştur. Tüm sürüşler 20–30 °C ortam sıcaklığında ve güneşli hava koşullarında gerçekleştirilmiştir. Referans, seri üretim ve aday lastikler; X1/X2/X3 veya aynı teknik özelliklere sahip seri üretim araçlarına monte edilerek aynı güzergâhta ve eşdeğer test koşulları altında ardışık olarak teste tabi tutulmuştur. Toplam 25.000 km’lik sürüş süresince her 1.000 km’de bir görsel kusur değerlendirmesi ve diş derinliği ölçümü gerçekleştirilmiştir. Test programı kapsamında sürüşler; ilgili OEM test prosedürlerine uygun şekilde, belirlenen oranlarda farklı yol yüzeyleri ve kullanım koşullarını içerecek biçimde tamamlanmıştır. Kontroller sırasında Chip & Chunk veya benzeri aşınma mekanizmalarına ilişkin herhangi bir anormallik gözlemlendiğinde, ilgili teknik ekipler ve lastik tedarikçisi değerlendirme sürecine dahil edilmiştir. Ölçüm ve değerlendirme faaliyetleri; görsel inceleme yöntemleri ile lastik diş derinliği ölçümleri temel alınarak yürütülmüştür. Test çevrimi boyunca farklı yol karakteristiklerini temsil eden urban, extraurban, highway, mountain ve rough road yüzeyleri kullanılmıştır. Şekil 2’de test güzergâhlarında karşılaşılan asfalt, kaba pürüzlü yol, parke taş, bozuk yol ve taşlı yüzey örnekleri ile kilometre dağılım oranları verilmiştir. Farklı yol yüzeyi pürüzlülüklerinin sırt blok deformasyonu ve Chip & Chunk oluşumu üzerindeki etkileri saha koşullarında değerlendirilmiştir.



Şekil 2. Test güzergâhlarında kullanılan farklı yol yüzeyleri ve kilometre dağılımlarına ait örnekler.

2.2 Değerlendirme Kriterleri

Değerlendirme kriterleri kapsamında lastiklerde Chip & Chunk oluşumunun varlığı ile birlikte erken aşınma, düzensiz aşınma ve benzeri yüzey bozulmalarının oluşup oluşmadığı kontrol edilmiştir. Görsel incelemeler sırasında özellikle sırt bloklarında kopma, parçalanma, kenar kırılması, lokal malzeme kaybı ve anormal aşınma karakteristikleri değerlendirilmiştir.

3. BULGULAR VE ANALİZ

25.000 km'ye kadar gerçekleştirilen takip çalışmaları sonucunda, 16" hafif ticari araç lastiklerinde off-road kullanım oranlarının OEM normları ile uyumlu tutulduğu koşullarda başlangıç seviyesinde kritik Chip & Chunk hasarına rastlanmamıştır. Test edilen 215/65 R16 C – 106/104 T ölçüsündeki aday

lastiklerde, özellikle sınırlı off-road maruziyetine sahip sürüş senaryolarında yalnızca kabul edilebilir seviyede lokal yüzey bozulmaları gözlemlenmiştir.

İlk değerlendirmelerde gözlenen Chip & Chunk oluşumunun doğrudan lastik tasarımından kaynaklandığı düşünülmüş olsa da, referans ve seri üretim lastikleri ile gerçekleştirilen karşılaştırmalı analizler sonucunda; yol tipi, off-road kullanım oranı ve test çevrimi gibi operasyonel parametrelerin hasar oluşumu üzerinde belirleyici etkiye sahip olduğu belirlenmiştir.

Özellikle kaba asfalt, stabilize yol ve parke taş gibi agresif yüzey karakteristiğine sahip güzergâhlarda sırt blokları üzerinde daha yüksek seviyede lokal gerilim olduğu gözlemlenmiştir. Buna karşılık düzgün asfalt ve otoban koşullarında aşınma davranışının daha homojen ilerlediği görülmüştür.

Bununla birlikte, sırt desen geometrisi ve sırt karışımı özelliklerinin zorlu kullanım koşullarında Chip & Chunk oluşumuna olan hassasiyeti artırabileceği değerlendirilmektedir. Özellikle sırt blok rijitliği ve lokal deformasyon davranışının, hasarın başlangıç ve ilerleme mekanizması üzerinde etkili olduğu düşünülmektedir.

Gerçekleştirilen doğrulama çalışmaları sonucunda aday lastiğin mevcut OEM kullanım koşulları açısından kabul edilebilir performans seviyesinde olduğu doğrulanmıştır.

Testler sırasında araç yük dağılımları ve toplam araç ağırlıkları düzenli olarak takip edilmiştir. Tablo 1’de X2 araçlarına ait ön/arka aks yükleri ve toplam araç ağırlıkları verilmiştir. Yük dağılımındaki değişimlerin lastik aşınma davranışı ve sırt bölgesindeki lokal gerilim oluşumları üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir.

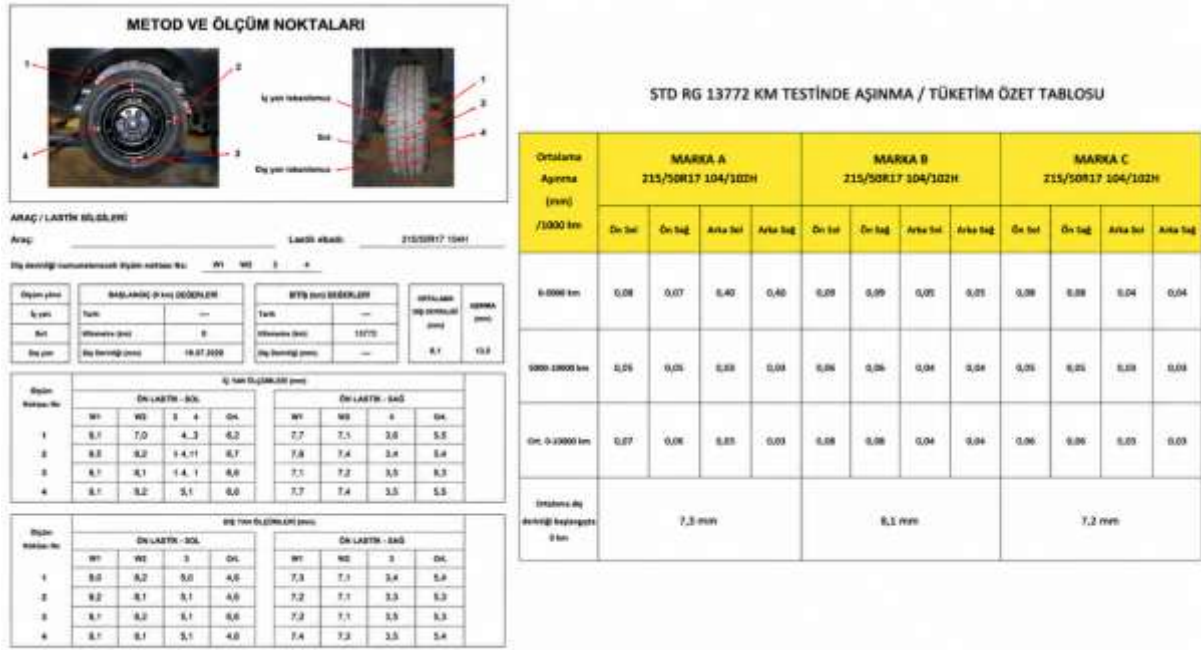
Tablo 1. Test araçlarına ait ön/arka aks yük dağılımları ve toplam araç ağırlıkları.

X2-1			X2-2			X2-24		
ÖN AKS			ÖN AKS			ÖN AKS		
ÖN SOL (kg)	ÖN SAĞ (kg)	ÖN AKS TOPLAM (kg)	ÖN SOL (kg)	ÖN SAĞ (kg)	ÖN AKS TOPLAM (kg)	ÖN SOL (kg)	ÖN SAĞ (kg)	ÖN AKS TOPLAM (kg)
612	572	1184	615	574	1189	523	520	1043
ARKA AKS			ARKA AKS			ARKA AKS		
ARKA SOL (kg)	ARKA SAĞ (kg)	ARKA AKS TOPLAM (kg)	ARKA SOL (kg)	ARKA SAĞ (kg)	ARKA AKS TOPLAM (kg)	ARKA SOL (kg)	ARKA SAĞ (kg)	ARKA AKS TOPLAM (kg)
320	321	641	324	321	645	332	328	660
TOPLAM ARAÇ AĞIRLIĞI (YANLARA GÖRE)			TOPLAM ARAÇ AĞIRLIĞI (YANLARA GÖRE)			TOPLAM ARAÇ AĞIRLIĞI (YANLARA GÖRE)		
TOPLAM SOL YAN (kg)		TOPLAM SAĞ YAN (kg)	TOPLAM SOL YAN (kg)		TOPLAM SAĞ YAN (kg)	TOPLAM SOL YAN (kg)		TOPLAM SAĞ YAN (kg)
932		893	939		895	855		848
TOPLAM ARAÇ AĞIRLIĞI			TOPLAM ARAÇ AĞIRLIĞI			TOPLAM ARAÇ AĞIRLIĞI		
1825			1834			1703		

Tüm değerler kg cinsindendir.

Şekil 3'te lastik aşınma ölçüm noktaları ile farklı lastiklere ait aşınma/tüketim karşılaştırma sonuçları verilmiştir. Test süresince ön aks lastiklerinde belirli kilometre aralıklarında iç yan, sırt ve dış yan bölgelerinden dış derinliği ölçümleri alınmış ve farklı lastik desenlerinin aşınma davranışları karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.

Değerlendirme kriterleri kapsamında lastiklerde Chip & Chunk oluşumu ile birlikte erken aşınma, düzensiz aşınma ve benzeri yüzey bozulmalarının oluşup oluşmadığı kontrol edilmiştir.



Şekil 3. Lastik aşınma ölçüm noktaları ve farklı lastiklere ait aşınma karşılaştırma sonuçları.

Şekil 4'te Chip & Chunk probleminin kök neden analiz süreci ile farklı kilometrelerde gerçekleştirilen saha gözlemleri verilmiştir. Yapılan incelemeler sonucunda problemin yalnızca lastik tasarımına bağlı olmadığı; yol yüzeyi karakteristiği, çevresel koşullar ve saha test çevrimlerinin Chip & Chunk oluşumu üzerinde önemli etkiye sahip olduğu belirlenmiştir.

Görsel incelemeler sırasında özellikle sırt bloklarında kopma, parçalanma, kenar kırılması, lokal malzeme kaybı ve anormal aşınma karakteristikleri değerlendirilmiştir.



Şekil 4. *Chip & Chunk probleminin analiz süreci ve farklı kilometrelerde gerçekleştirilen saha gözlemleri.*

SONUÇ VE TARTIŞMA

Bu çalışma kapsamında hafif ticari araç lastiklerinde gözlemlenen Chip & Chunk aşınma mekanizması; farklı yol yüzeyleri, yük koşulları ve saha test çevrimleri altında değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, Chip & Chunk oluşumunun yalnızca lastik tasarımına bağlı bir problem olmadığını; yol yüzeyi karakteristiği, off-road kullanım oranı, sıcaklık ve operasyonel sürüş koşulları gibi çevresel parametrelerden önemli ölçüde etkilendiğini göstermektedir.

25.000 km'ye kadar gerçekleştirilen saha testleri sonucunda, özellikle off-road kullanım oranlarının OEM validasyon kriterleri ile uyumlu tutulduğu koşullarda kritik seviyede Chip & Chunk hasarına rastlanmamıştır. Test edilen 215/65 R16C 106/104T ölçüsündeki aday lastiklerde belirli kilometre seviyelerinde lokal yüzey bozulmaları gözlemlenmiş olsa da bu hasarların fonksiyonel performans, güvenlik ve dayanıklılık kriterlerini olumsuz etkileyecek kritik seviyeye ulaşmadığı belirlenmiştir.

İlk değerlendirmelerde problemin doğrudan lastik tasarımından kaynaklandığı düşünülmüş olsa da, referans ve seri üretim lastikleri ile gerçekleştirilen karşılaştırmalı analizler sonucunda; agresif yol yüzeyi karakteristiği ve farklı saha test koşullarının hasar oluşumu üzerinde belirleyici etkiye sahip olduğu anlaşılmıştır. Özellikle Türkiye yol koşullarında gerçekleştirilen testlerin, Avrupa merkezli standart validasyon çevrimlerine kıyasla daha yüksek seviyede kaba yol ve off-road karakteristiği içerdiği değerlendirilmiştir. Bu durumun, OEM validasyon süreçlerinde kullanılan yol sınıflandırma kriterlerinin bölgesel kullanım koşullarına göre yeniden değerlendirilmesi gerekliliğini ortaya koyduğu düşünülmektedir.

Bununla birlikte sırt deseni ve sırt karışımı özelliklerinin Chip & Chunk oluşumuna olan hassasiyet üzerinde etkili olduğu değerlendirilmektedir. Ancak sırt karışım ve desen geometrisine yönelik önemli tasarım değişikliklerinin; lastiğin sürüş karakteristiği, aşınma davranışı, yuvarlanma direnci ve genel validasyon performansı üzerinde doğrudan etkili olacağı açıktır. Bu nedenle mevcut ürünün OEM iç/dış saha test kriterlerini karşılaması durumunda, gözlenen sınırlı seviyedeki Chip & Chunk oluşumunun kabul edilebilir performans aralığında değerlendirilebileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Literatür bulguları ve saha test sonuçları birlikte değerlendirildiğinde, standart laboratuvar test çevrimlerinin gerçek kullanım koşullarını her zaman tam olarak temsil edemediği görülmektedir.

Özellikle hafif ticari araç segmentinde kullanılan lastiklerin; stabilize yol, parke taş, kaba asfalt ve yüksek sıcaklık gibi ağır saha koşulları altında ayrıca değerlendirilmesi gerektiği düşünülmektedir.

Bu doğrultuda OEM ön doğrulama süreçlerinde Chip & Chunk performansının daha erken aşamada ele alınması önerilmektedir. RFQ ve CTS süreçlerine özel Chip & Chunk saha testi gereksinimlerinin dahil edilmesi; tedarikçi lastik performansının ağır yol koşulları altında daha doğru şekilde değerlendirilebilmesine katkı sağlayacaktır. Ayrıca gerçek kullanım koşullarını temsil eden saha test çevrimlerinin validasyon süreçlerindeki ağırlığının artırılması ve bölgesel yol karakteristiklerinin OEM White Book sınıflandırmalarına daha detaylı şekilde entegre edilmesi önerilmektedir.

KAYNAKÇA

Gent, A. N., & Walter, J. D. (2006). *The pneumatic tire*. Washington, DC: National Highway Traffic Safety Administration.

Persson, B. N. J. (2000). *Sliding friction: Physical principles and applications* (2nd ed.). Berlin, Germany: Springer.

Williams, J. A. (2005). *Engineering tribology* (3rd ed.). Cambridge, England: Cambridge University Press

Gizli Aydınlatma Sistemleri

Furkan CENGİZÖĞLU

furkan.cengizoglu@tofas.com.tr; Mühendislik Uzmanı, TOFAŞ Türk Otomobil Fabrikası A. Ş. Ar-Ge Merkezi, Bursa/Türkiye.

Özet

Otomotiv aydınlatma sistemleri, araçların ilk gelişim dönemlerinden itibaren temel olarak sürüş güvenliği ve görünürlük gereksinimlerini karşılamak amacıyla tasarlanmıştır. Ön farlar, stop lambaları ve sinyalizasyon elemanları uzun yıllar boyunca yalnızca fonksiyonel bileşenler olarak değerlendirilmiş; tasarım üzerindeki etkileri ikincil planda kalmıştır. Ancak son yıllarda otomotiv sektöründe artan rekabet, kullanıcı beklentilerinin değişmesi ve marka kimliğinin ön plana çıkmasıyla birlikte aydınlatma sistemleri, araç dış tasarımının en ayırt edici unsurlarından biri haline gelmiştir. Bu dönüşüm sürecinde, fonksiyonel aydınlatmadan tasarım odaklı aydınlatmaya geçiş gözlemlenmektedir. Aydınlatma elemanları artık yalnızca yolu aydınlatmak veya aracın varlığını bildirmekle kalmamakta; aynı zamanda markaya özgü imza oluşturma, algılanan kaliteyi artırma ve araç ile kullanıcı arasında duygusal bir bağ kurma görevini de üstlenmektedir. Bu yaklaşım, araç gövdesinde daha sade, kesintisiz ve bütüncül yüzey tasarımlarını beraberinde getirmiştir. Bu bağlamda “gizli aydınlatma (hidden lighting)” kavramı ortaya çıkmıştır. Gizli aydınlatma sistemleri, aktif olmadıkları durumda gövde yüzeyinde görsel olarak algılanmayan; yalnızca çalıştıklarında ortaya çıkan aydınlatma çözümleri olarak tanımlanmaktadır. Bu sistemler, estetik avantajlarının yanı sıra mühendislik, regülasyon ve üretim açısından önemli zorluklar da barındırmaktadır. Amacı, gövde parçalarına entegre gizli aydınlatma sistemlerini; tasarım prensipleri, mevcut teknik yaklaşımlar, mühendislik problemleri, ECE regülasyonları ve seri üretilebilirlik kriterleri çerçevesinde değerlendirmektir.

Anahtar Kelimeler: Gizli aydınlatma sistemleri, gövde entegrasyonu, otomotiv dış aydınlatma

Abstract

Automotive lighting systems were originally developed to meet basic driving safety and visibility requirements. For many years, headlamps, rear lamps, and signaling devices were considered purely functional components, with limited impact on overall vehicle design. In recent years, however, increased competition in the automotive industry, changing customer expectations, and the growing importance of brand identity have made lighting one of the key elements of exterior vehicle design.

This development has led to a shift from function-focused lighting to design-focused lighting. Lighting elements are no longer used only to illuminate the road or make the vehicle visible; they also help create brand-specific light signatures, improve perceived quality, and build an emotional connection between the vehicle and its users. As a result, designers increasingly aim for cleaner, more seamless, and fully integrated exterior body surfaces. Within this context, the concept of “hidden lighting” has gained attention. Hidden lighting systems are lighting solutions that remain visually

unnoticeable on the vehicle body when turned off and become visible only when activated. Although these systems provide clear aesthetic benefits, they also create significant engineering, regulatory, and manufacturing challenges. This paper evaluates hidden lighting systems integrated into vehicle body components from the perspectives of design principles, technical approaches, engineering constraints, ECE regulations, and mass production requirements.

Keywords: Hidden lighting systems, body-integrated lighting, automotive exterior lighting.

1. GİRİŞ

Otomotiv aydınlatma sistemleri, araçların ilk geliştirildiği dönemlerden itibaren sürüş güvenliği ve görünürlük ihtiyaçlarını karşılamak amacıyla tasarlanmıştır. İlk dönem araçlarda kullanılan aydınlatma sistemleri oldukça basit bir yapıya sahip olup, temel amaç aracın gece koşullarında fark edilebilir olmasını sağlamak ve sürücünün görüş mesafesini artırmaktır. Uzun yıllar boyunca ön farlar, arka lambalar ve sinyalizasyon elemanları yalnızca fonksiyonel bileşenler olarak değerlendirilmiş; estetik katkıları sınırlı düzeyde kalmıştır.

Teknolojinin gelişmesiyle birlikte otomotiv aydınlatmaları önemli bir dönüşüm yaşamıştır. Halojen sistemlerden xenon sistemlere, ardından LED ve matrix LED teknolojilerine geçiş, yalnızca performans artışı değil aynı zamanda tasarım özgürlüğü de sağlamıştır. Özellikle LED teknolojinin sunduğu kompakt yapı, düşük enerji tüketimi ve esnek geometrik kullanım imkânları sayesinde aydınlatma elemanları araç tasarımının aktif bir parçası haline gelmiştir (SAE International, 2021; Reisinger, 2020; Bullough, 2019).

Günümüzde otomotiv sektöründe marka kimliği ve kullanıcı algısı büyük önem taşımaktadır. Birçok üretici, araçlarının gece görünümünü karakteristik ışık imzaları ile ayırt edilebilir hale getirmeye çalışmaktadır.

Bu süreçte araç dış yüzeylerinde daha sade, kesintisiz ve bütünleşik tasarım anlayışı ön plana çıkmıştır. Geleneksel görünür aydınlatma elemanları, özellikle minimalist yüzey yaklaşımıyla çelişmeye başlamış ve bu durum gizli aydınlatma sistemlerinin gelişimini hızlandırmıştır.

Gizli aydınlatma sistemleri, aydınlatma elemanlarının pasif durumda görünmez olması ve yalnızca aktif olduğunda ortaya çıkması prensibine dayanmaktadır. Bu yaklaşım estetik açıdan önemli avantajlar sunmasına rağmen, mühendislik, üretim ve regülasyon açısından yeni problemlerin ortaya çıkmasına neden olmaktadır.

Bu çalışmanın amacı, gövde parçalarına entegre gizli aydınlatma sistemlerini tasarım, teknik altyapı, üretilebilirlik ve regülasyon boyutlarıyla incelemek ve otomotiv sektöründeki gelecekteki etkilerini değerlendirmektir.

2. GİZLİ AYDINLATMA KAVRAMI VE TASARIM YAKLAŞIMI

Gizli aydınlatma veya görünmez aydınlatma olarak tanımlanan sistemler, araç dış yüzeyindeki aydınlatma elemanlarının pasif durumda gövdeyle bütünleşik şekilde algılanmasını sağlayan çözümler olarak ifade edilmektedir. Bu sistemlerde temel hedef, aydınlatma elemanlarını ayrı bir bileşen gibi göstermek yerine gövde yüzeyinin doğal devamı haline getirmektir (SAE International, 2021; Reisinger, 2020).

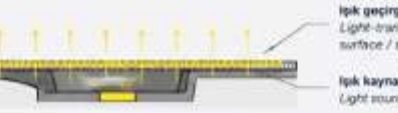
Klasik otomotiv aydınlatmalarında lens, reflektör ve optik elemanlar sürekli görünür durumdadır. Gizli aydınlatma sistemlerinde ise yüzeyler opak, yarı saydam veya gövde rengiyle uyumlu şekilde tasarlanarak aydınlatma elemanlarının görünürlüğü azaltılır. Sistem aktif olduğunda ise ışık geçirgenliği sağlanarak gerekli aydınlatma fonksiyonu yerine getirilir.

Bu yaklaşım, özellikle modern araç tasarımlarında tercih edilen sade yüzey anlayışına uyum sağlamaktadır. Araç gövdesi üzerindeki çizgilerin azaltılması, parçaların görsel olarak birleştirilmesi ve daha teknolojik bir algı oluşturulması açısından gizli aydınlatma önemli avantajlar sunmaktadır.

Gizli aydınlatma sistemleri farklı kullanım senaryolarında uygulanabilmektedir. Bunlar arasında:

- Gündüz görünmez, gece aktif aydınlatma çözümleri,
- Logo ve marka imzası aydınlatmaları,
- Izgara ve gövde yüzeyi aydınlatmaları,
- Karşılama animasyonları,
- Adaptif iletişim aydınlatmaları yer almaktadır.

Bu sistemler yalnızca estetik amaçlı değil; aynı zamanda kullanıcı deneyimini artıran etkileşimli yüzeyler oluşturma açısından da önem taşımaktadır.

	KLASİK GÖRÜNÜR AYDINLATMA Conventional Visible Lighting	GİZLİ AYDINLATMA SİSTEMİ Hidden Lighting System
PASİF DURUM (IŞIK KAPALI) Passive State (Light OFF)	 Aydınlatma elemanları pasif durumda da gövdeden görünür. Lighting components are visible on the body even in the passive state.	 Aydınlatma sistemi pasif durumda gövde yüzeyiyle bütünleşiktir ve tamamen gizlidir. Lighting system is fully integrated with the body surface and completely invisible in the passive state.
AKTİF DURUM (IŞIK AÇIK) Active State (Light ON)	 Aydınlatma elemanları aktif durumda ışık yayar. Lighting components emit light in the active state.	 Aydınlatma sistemi aktif olduğunda ışık yüzeyden ortaya çıkar. Lighting system becomes visible and emits light when activated.
YAPI KESİTİ (ŞEMATİK) Structure Cross-Section (Schematic)	 Görünür lens Visible lens Işık kaynağı Light source	 Işık geçirgen yüzey / yapı Light-transmitting surface / structure Işık kaynağı Light source

Şekil 1. Klasik görünür aydınlatma ile gizli aydınlatma sistemlerinin kavramsal karşılaştırması.

3. TEKNİK UYGULAMA YÖNTEMLERİ

Gizli aydınlatma sistemlerinin uygulanabilmesi için farklı teknik çözümler geliştirilmektedir. Kullanılan yöntemler; optik performans, üretim maliyeti, estetik beklenti ve regülasyon gereksinimlerine bağlı olarak değişmektedir.

3.1 Body-Color Lens Uygulamaları

Body-color lens uygulamaları, gizli aydınlatma sistemlerinde en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir. Bu yaklaşımda aydınlatma lensleri gövde rengiyle uyumlu pigmentler kullanılarak renklendirilmektedir. Böylece ışık kapalı olduğunda lens yüzeyi çevresindeki gövdeyle bütünleşmekte ve tek parça algısı oluşmaktadır.

Sistem aktif hale geçtiğinde ise lens içerisinden ışık geçişi sağlanmaktadır. Ancak bu yöntemde kullanılan pigmentler ışık geçirgenliğini doğrudan etkilediği için optik performans dikkatli şekilde optimize edilmelidir.

Body-color lens uygulamalarında karşılaşılan temel problemler arasında:

- Işık şiddetindeki kayıplar,
- Renk sapmaları,
- Gün ışığında farklı algılanma,
- Homojenlik problemleri yer almaktadır.

Bu nedenle optik simülasyon çalışmaları ve malzeme testleri büyük önem taşımaktadır (BASF, 2022; Covestro, 2021).



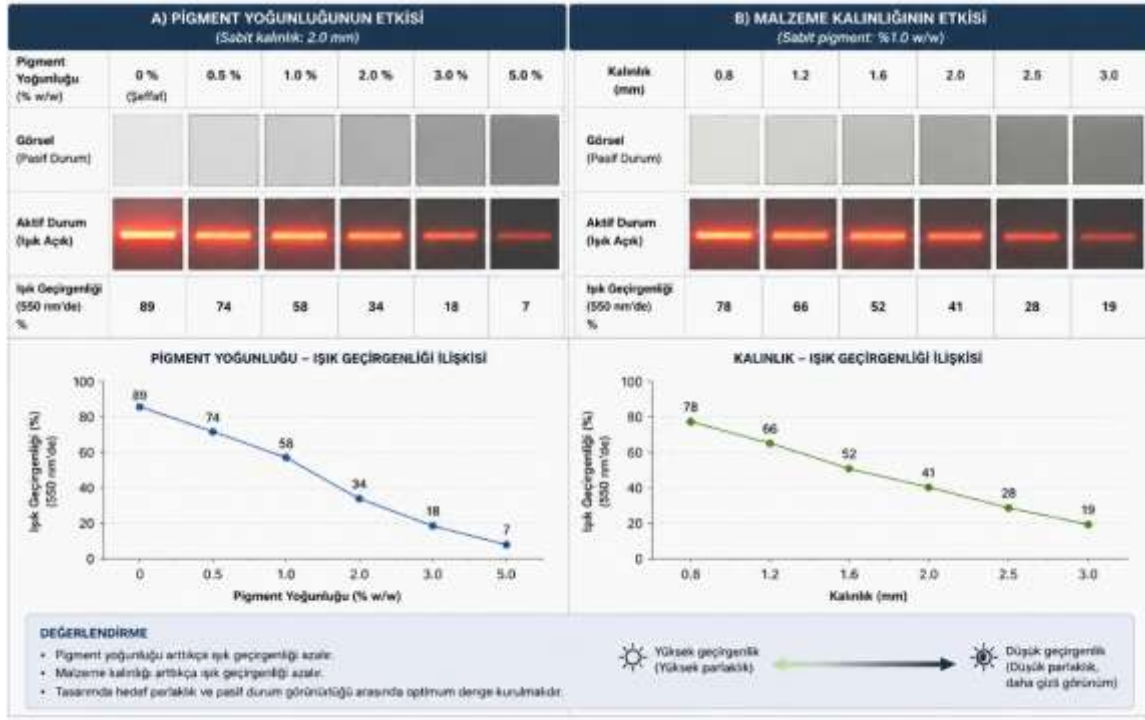
Şekil 2. Body-color lens yapısının pasif ve aktif durum karşılaştırması.

3.2 Işık Geçirgen Plastik Malzemeler

Işık geçirgen plastik malzemeler, gizli aydınlatma sistemlerinin gelişiminde önemli rol oynamaktadır. Bu malzemeler belirli dalga boylarındaki ışığın geçişine izin verirken dış ortamdan bakıldığında opak görünüm sunabilmektedir.

Pigment tipi, malzeme kalınlığı ve yüzey yapısı ışık geçirgenliğini doğrudan etkilemektedir. Özellikle geniş yüzeylerde homojen ışık dağılımı sağlanması ciddi mühendislik çalışmaları gerektirmektedir.

Günümüzde PC, PMMA ve özel optik plastik türevleri bu tür uygulamalarda kullanılmaktadır (BASF, 2022; Covestro, 2021). Bunun yanında çok katmanlı plastik yapılar ve farklı kaplama teknolojileri de geliştirilmektedir.



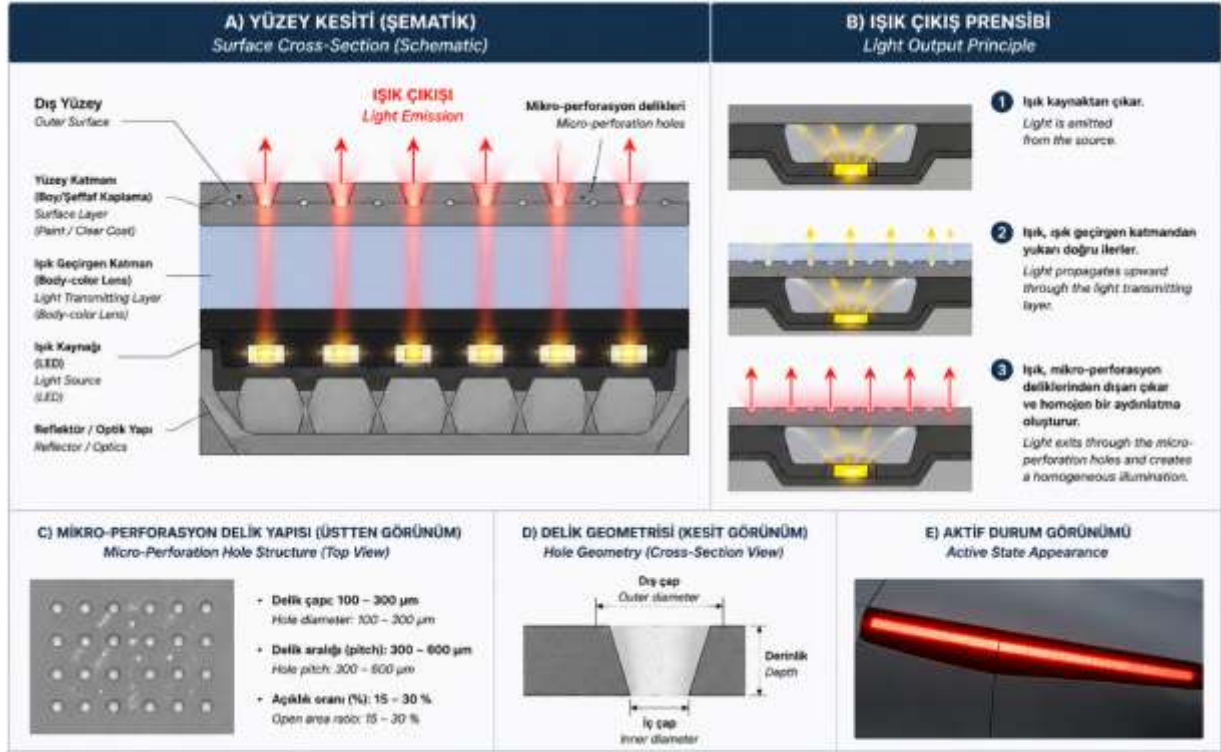
Şekil 3. Pigment yoğunluğu ve malzeme kalınlığının ışık geçirgenliği üzerindeki etkisi.

3.3 Mikro-Perforasyon ve Lazer Yüzey İşleme

Mikro-perforasyon ve lazer etching yöntemleri özellikle logo, yazı ve karakteristik imza aydınlatmalarında tercih edilmektedir. Bu yöntemde yüzey üzerinde çıplak gözle algılanması zor mikro delikler veya desenler oluşturulmaktadır.

Aydınlatma aktif olduğunda ışık yalnızca bu alanlardan dışarı çıkmakta ve kontrollü bir görüntü oluşturmaktadır. Bu yaklaşım yüksek estetik kalite sunmasına rağmen üretim süreçleri açısından hassasiyet gerektirmektedir (SAE International, 2021; Bullough, 2019).

Mikro-perforasyon yöntemlerinde delik çapı, dağılım geometrisi ve yüzey kalitesi doğrudan görsel performansı etkilemektedir.

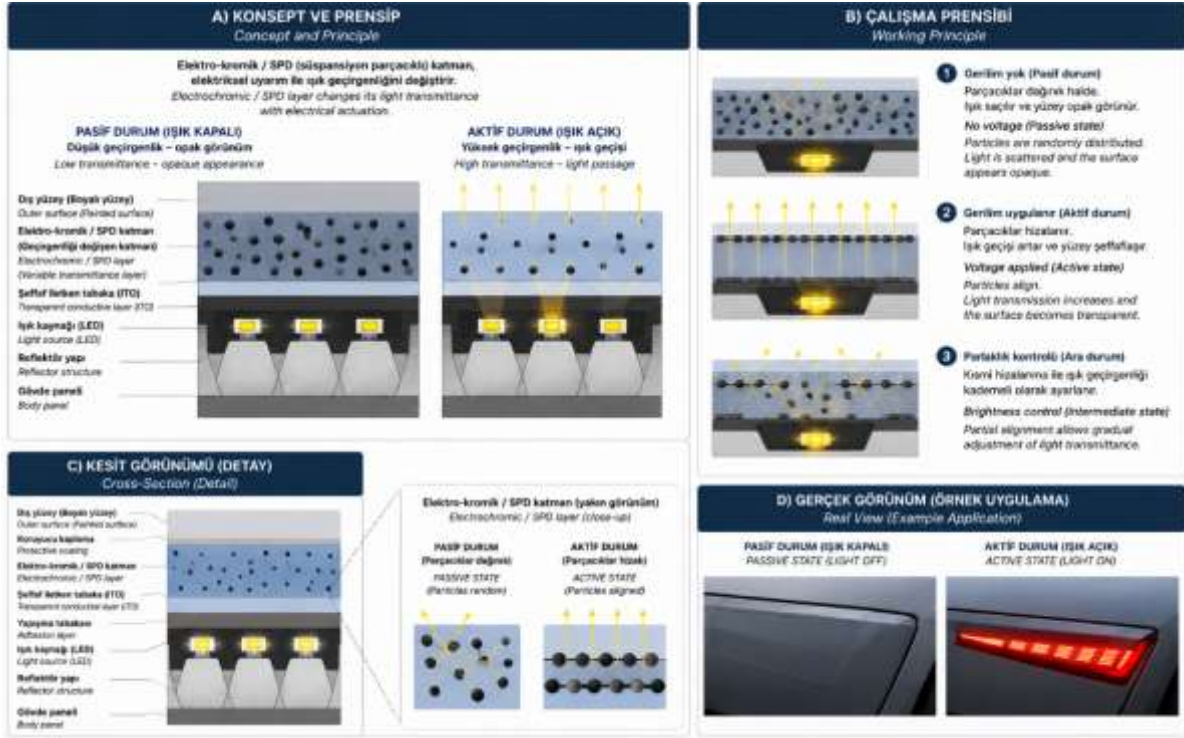


Şekil 4. Mikro-perforasyon tekniğinde yüzey kesiti ve ışık çıkış prensibi.

3.4 Aktif Şeffaflaşan Yüzeyler

Gelişmiş malzeme teknolojileri sayesinde pasif durumda opak görünen ancak aktif durumda ışık geçirgenliği artan yüzeyler geliştirilmektedir. Bu teknoloji, gizli aydınlatma yaklaşımının en ileri örneklerinden biri olarak değerlendirilmektedir.

Elektrokromik katmanlar, özel film yapıları ve akıllı yüzey teknolojileri bu sistemlerin temelini oluşturmaktadır (BASF, 2022; Covestro, 2021). Henüz maliyet ve seri üretim açısından sınırlı uygulamaya sahip olsalar da gelecekte yaygınlaşmaları beklenmektedir.



Şekil 5. Aktif durumda ışık geçirgenliği değişen yüzey yapısı.

4. MÜHENDİSLİK PROBLEMLERİ VE TASARIM KISITLARI

Gizli aydınlatma sistemleri, estetik avantajlarının yanında önemli mühendislik problemleri ve tasarım kısıtları oluşturmaktadır. Bu sistemlerin seri üretime uygun hale getirilebilmesi için çok disiplinli bir mühendislik yaklaşımı gerekmektedir.

4.1 Optik Homojenlik Problemleri

En temel problemlerden biri, yüzey boyunca homojen ışık dağılımının sağlanmasıdır. Noktasal LED kaynakları, yüzeyde hotspot oluşumuna neden olabilmekte ve istenmeyen parlaklık farkları yaratabilmektedir. Bu nedenle ışık kılavuzları, difüzör yapıları ve optik yüzey tasarımları kullanılmaktadır (Reisinger, 2020; Bullough, 2019).

4.2 Gündüz ve Gece Algı Farklılıkları

Gündüz koşullarında görünmez olması hedeflenen bir sistemin gece yeterli görünürlüğe sahip olması gerekmektedir. Bu iki gereksinim çoğu zaman birbirine ters davranış göstermektedir. Gündüz yeterince opak görünen bir yüzey, gece istenen ışık şiddetini sağlamayabilmektedir.

4.3 Pigment ve Kalınlık Etkisi

Pigment yoğunluğu ve malzeme kalınlığı ışık geçirgenliğini doğrudan etkileyen parametrelerdir. Seri üretimde oluşabilecek küçük varyasyonlar bile görsel performansta ciddi farklılıklara neden olabilmektedir.

Bu nedenle üretim toleranslarının sıkı kontrol edilmesi gerekmektedir.

4.4 Isıl Etkiler ve Yaşlanma

LED sistemlerinden yayılan ısı, plastik malzemelerde zamanla renk değişimi, sararma ve yüzey deformasyonu oluşturabilmektedir. Bu durum özellikle uzun ömür beklentisi olan dış trim parçalarında önemli risk oluşturmaktadır. Termal analizler ve yaşlandırma testleri bu nedenle kritik öneme sahiptir (BASF, 2022; Covestro, 2021).

4.5 Tolerans Yönetimi ve Montaj Hassasiyeti

Gizli aydınlatma sistemlerinde boşluk & seviye problemleri klasik sistemlere göre çok daha görünür hale gelmektedir. Gövde parçaları arasındaki hizalama problemleri, ışık çizgilerinde kırılma veya yüzey devamlılığında bozulma yaratabilmektedir. Bu nedenle montaj hassasiyeti, tolerans zinciri ve kalite kontrol kriterleri yeniden değerlendirilmelidir.

5. REGÜLASYON VE HOMOLOGASYON PERSPEKTİFİ

Araç dış aydınlatmaları, uluslararası güvenlik standartları kapsamında sıkı regülasyonlara tabidir. Avrupa Ekonomik Komisyonu (ECE – United Nations Economic Commission for Europe), araç güvenliği ve teknik uyumluluk amacıyla otomotiv sektöründe yaygın olarak kullanılan regülasyonları oluşturmaktadır. ECE regülasyonlarının temel amacı:

- Trafik güvenliğini artırmak,
- Araçların birbirleri tarafından doğru algılanmasını sağlamak,
- Farklı üreticiler arasında standart oluşturmak,
- Minimum görünürlük seviyelerini garanti altına almak olarak özetlenebilir.

Gizli aydınlatma sistemleri açısından özellikle ECE R48, R148 ve R149 regülasyonları önem taşımaktadır (UNECE, 2019a, 2019b, 2019c).

Tablo 1. *Regülasyonlar ve Kapsamları*

Regülasyon	Kapsam	Hidden Lighting Etkisi
ECE R48	Aydınlatma montaj şartları	Görünürlük ve konum kısıtları
ECE R148	Işıklı sinyal cihazları	Fotometrik gereksinimler
ECE R149	Yol aydınlatma cihazları	Işık dağılım kriterleri

Gizli aydınlatma sistemleri özellikle gündüz algılanabilirliği, minimum ışık şiddeti ve görüş açıları açısından regülasyonlarla potansiyel çatışmalar oluşturmaktadır.

Bu nedenle otomobil üreticileri genellikle gizli aydınlatma çözümlerini doğrudan güvenlik fonksiyonları yerine destekleyici veya dekoratif fonksiyonlar kapsamında kullanmaktadır.

Son yıllarda adaptif aydınlatmalar, animasyonlu sinyaller ve araç-dışı iletişim sistemleri üzerine yapılan çalışmalar, mevcut regülasyonların gelecekte daha esnek hale gelmesini gerekli kılmaktadır.

6. ÜRETİM VE GÖVDE ENTEGRASYONU

Gizli aydınlatma sistemleri yalnızca estetik bir çözüm değil; aynı zamanda üretim süreçlerini etkileyen bir mühendislik yaklaşımıdır.

Geleneksel otomotiv üretiminde aydınlatma elemanları genellikle gövdeden bağımsız modüller olarak tasarlanmakta ve montaj hattında sonradan araca eklenmektedir. Gizli aydınlatma yaklaşımında ise aydınlatma, doğrudan gövde yüzeyinin bir parçası haline gelmektedir.

Bu durum özellikle plastik enjeksiyon parçalarının önemini artırmaktadır (BASF, 2022; Covestro, 2021). Büyük ölçekli plastik gövde modülleri, aydınlatma elemanlarının yüzeye entegre edilmesini kolaylaştırmaktadır.

Saç-metal ağırlıklı geleneksel mimarilerde yüzey bütünlüğü oluşturmak daha zor iken, plastik bazlı yüzeylerde daha kompleks geometriler ve ışık geçirgen yapılar oluşturulabilmektedir.

Boya süreçleri açısından bakıldığında, yarı saydam boyalar ve özel pigmentler mevcut boya proseslerinde ek kontrol gereksinimleri oluşturmaktadır. Boya kalınlığındaki küçük farklılıklar bile ışık geçirgenliği üzerinde doğrudan etkili olabilmektedir.

Montaj hattında ise boşluk & seviye toleransları daha kritik hale gelmektedir. Özellikle sürekli ışık imzası kullanılan uygulamalarda küçük hizalama hataları bile görsel kaliteyi ciddi şekilde etkileyebilmektedir.

Bu nedenle:

- Kalite kontrol sistemleri,
- Tolerans yönetimi,
- Proses tekrarlanabilirliği,
- Yüzey kalite kriterleri,
- Termal deformasyon analizleri ön plana çıkmaktadır.

Gizli aydınlatma sistemleri aynı zamanda maliyet açısından da yeni değerlendirmeler gerektirmektedir. İlk yatırım maliyetleri yüksek olsa da parça entegrasyonu sayesinde uzun vadede modül sayısının azalması mümkün olabilmektedir.

7. GELECEK TRENDLERİ VE ÖNGÖRÜLER

Gelecekte otomotiv dış yüzeylerinde daha akıllı, daha etkileşimli ve daha bütünleşik çözümlerin yaygınlaşması beklenmektedir. Gizli aydınlatma sistemleri bu dönüşümün temel bileşenlerinden biri olarak değerlendirilmektedir.

Özellikle smart surface yaklaşımı, araç gövdesinin yalnızca taşıyıcı bir yapı olmaktan çıkarak kullanıcıyla iletişim kuran aktif bir arayüze dönüşmesini hedeflemektedir [9,12].

Bu kapsamda:

- Işıklı ızgara sistemleri,
- Adaptif iletişim aydınlatmaları,
- Otonom araç iletişim yüzeyleri,
- Animasyonlu dış yüzeyler,
- Sensör ve aydınlatma entegrasyonu gibi uygulamalar ön plana çıkmaktadır.

Plastik malzeme teknolojilerindeki gelişmeler, gizli aydınlatma sistemlerinin geleceği açısından kritik önem taşımaktadır. Özellikle çok katmanlı plastik yapılar içerisine entegre edilen ışık kaynakları sayesinde daha ince, daha hafif ve daha fonksiyonel gövde parçaları geliştirilmektedir.

Geleneksel sac-metal gövde mimarilerinin yerini alan büyük plastik modüller, aydınlatma ve sensör teknolojilerinin doğrudan yüzeye entegre edilmesini mümkün hale getirmektedir.

Bu yaklaşım sayesinde:

- Kablo karmaşıklığı azalmakta,
- Montaj süreçleri sadeleşmekte,
- Daha yüksek yüzey bütünlüğü sağlanmakta,
- Yeni kullanıcı deneyimleri oluşturulabilmektedir.

Gelecekte araç gövdesinin pasif bir yapı olmaktan çıkarak aktif ve iletişim kurabilen bir yüzeye dönüşmesi beklenmektedir. Gizli aydınlatma sistemleri bu dönüşümün en önemli adımlarından biri olarak görülmektedir.

8. SONUÇ

Bu çalışmada gövde parçalarına entegre gizli aydınlatma sistemleri tasarım, mühendislik, üretim ve regülasyon perspektiflerinden değerlendirilmiştir. Yapılan incelemeler, gizli aydınlatma sistemlerinin yalnızca estetik bir trend olmadığını; aynı zamanda otomotiv gövde tasarımı ve üretim yöntemlerinde dönüşüm yaratan önemli bir teknoloji alanı olduğunu göstermektedir. Body-color lensler, ışık geçirgen plastikler, mikro-perforasyon yöntemleri ve aktif yüzey teknolojileri gibi çözümler sayesinde aydınlatma elemanları araç gövdesiyle daha bütünleşik hale gelmektedir. Ancak bu sistemler; optik homojenlik, termal dayanım, pigment kontrolü, tolerans yönetimi ve regülasyon uyumu açısından önemli mühendislik problemleri oluşturmaktadır. Özellikle ECE regülasyonlarının mevcut yapısı, gizli aydınlatma sistemlerinin doğrudan güvenlik fonksiyonlarında kullanımını sınırlamaktadır. Buna rağmen

gelişen teknoloji ve adaptif aydınlatma çözümleri sayesinde gelecekte daha esnek regülasyon yaklaşımlarının oluşması beklenmektedir. Gelecek yıllarda akıllı yüzeyler, plastik bazlı gövde yapıları ve entegre sensör teknolojileri ile birlikte gizli aydınlatma sistemlerinin daha yaygın hale geleceği öngörülmektedir. Bu nedenle gizli aydınlatma sistemleri, geleceğin otomotiv tasarımında yalnızca görsel bir unsur değil; aynı zamanda araç-gövde-malzeme entegrasyonunun merkezinde yer alan stratejik bir teknoloji alanı olarak değerlendirilmektedir.

KAYNAKÇA

- BASF. (2022). *Optical plastics for automotive lighting applications*. BASF Technical Documentation.
- Bullough, J. D. (2019). *Lighting for vehicles: Visibility and perception*. SAE International.
- Covestro. (2021). *Light transmission materials for automotive lighting systems*. Covestro AG Technical Guide.
- Reisinger, J. (2020). *Automotive lighting and human vision*. Springer.
- SAE International. (2021). *Automotive lighting standards and practices*. SAE International.
- United Nations Economic Commission for Europe (UNECE). (2019a). *UN Regulation No. 48: Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to the installation of lighting and light-signalling devices*. <https://unece.org>
- United Nations Economic Commission for Europe (UNECE). (2019b). *UN Regulation No. 148: Light-signalling devices*. <https://unece.org>
- United Nations Economic Commission for Europe (UNECE). (2019c). *UN Regulation No. 149: Road illumination devices*. <https://unece.org>

Üç Tekerlekli Araçların Ön Direksiyon Çatalı Konfigürasyonlarının Sonlu Elemanlar Analizi Tabanlı Yapısal Performans Karşılaştırması

**Murat AKDOĞAN¹, Dr. Zafer GÜLER², Tolgahan BAYRAKDAR³, Onur ONARLAR⁴,
Furkan Mahir TAŞATAN⁵**

¹murat.akdogan@tofas.com.tr; Tofaş Türk Otomobil Fabrikası A.Ş., Ar-Ge Merkezi, Bursa/ Türkiye

²zafer.guler2@tofas.com.tr; Tofaş Türk Otomobil Fabrikası A.Ş., Ar-Ge Merkezi, Bursa/ Türkiye

³onur.onarlar@tofas.com.tr; Tofaş Türk Otomobil Fabrikası A.Ş., Ar-Ge Merkezi, Bursa/ Türkiye

⁴tolgahan.bayrakdar@tofas.com.tr; Tofaş Türk Otomobil Fabrikası A.Ş., Ar-Ge Merkezi, Bursa/ Türkiye

⁵furkan.mahirtasatan@tofas.com.tr; Tofaş Türk Otomobil Fabrikası A.Ş., Ar-Ge Merkezi, Bursa/ Türkiye

Özet

Son yıllarda, kentsel hareketlilik, mikro lojistik ve uygun maliyetli ulaşım çözümlerine yönelik artan talep nedeniyle üç tekerlekli araçların kullanımı hızla artmaktadır. Bu araçlar, farklı operasyonel gereksinimleri karşılayan çeşitli güç aktarma sistemi seçenekleriyle geliştirilmektedir. Bu çeşitlilik, mukavemet, dayanıklılık ve güvenlik açısından yapısal bileşenler üzerinde daha katı talepler ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, direksiyon çatalı yapısı kritik bir mühendislik bileşeni olarak ortaya çıkmaktadır. Bu çalışmada, üç tekerlekli araçlarda kullanılan direksiyon çatalı yapılarının mekanik performansına gövde imalat yöntemlerinin etkileri, sonlu eleman analizi (FEA) yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Çalışma boyunca malzeme özelliklerine ve dış/iç çaplara sahip borular kullanılmış olup, temel varyasyon amortisör montaj gövdesi tasarımında ortaya çıkmıştır. Buna göre, AISI 132 döküm gövde ve 30CrMo4 dövme gövde karşılaştırılmıştır. Ayrıca, şekil optimizasyonları da yapılmıştır. Analiz sonuçları, dövme gövdeli çatal yapısının daha iyi yorulma performansı sergilediğini göstermektedir. Boyuna yükleme koşulları altında, döküm gövde konfigürasyonunun yorulma ömrünün 1 milyon çevrimin altında olduğu, dövme gövde tasarımının ise önemli ölçüde daha yüksek ömür değerlerine ulaştığı tespit edilmiştir. Ek olarak, kazara ve tesadüfi yükleme koşulları altında, dövme konfigürasyonunda gözlemlenen plastik gerinim değerleri daha düşüktür. Maksimum yükleme koşulları altında dövme tasarımda daha yüksek gerilim değerleri kaydedilmiş olsa da, bu gerilimler elastik sınırlar içinde kalmıştır. Sonuçlar, dövme işleminin üç tekerlekli araçlar için direksiyon çatalı tasarımlarında yorulma ömrü ve yapısal güvenilirlik açısından önemli avantajlar sağladığını göstermektedir. Bu çalışma, temel yük taşıyıcı bileşenlerin performansında malzeme seçimi ve üretim yöntemlerinin kritik rolünü vurgulamakta ve bu tür tasarımları değerlendirmek için sonlu eleman analizinin etkinliğinin altını çizmektedir.

Anahtar Kelimeler: Direksiyon çatalı, Döküm, Dövme, Sonlu elemanlar analizi, Yorulma ömrü.

Abstract

In recent years, the use of three-wheeler vehicles has been rapidly increasing, driven by the growing demand for urban mobility, micro-logistics, and cost-effective transportation solutions. These

vehicles are developed with various powertrain options addressing diverse operational requirements. This diversity introduces stricter demands on structural components in terms of strength, durability, and safety. In this context, the steering fork structure emerges as a critical engineering component. In this study, the effects of the housing manufacturing methods on the mechanical performance of steering fork structures used in three-wheeler vehicles were investigated using the finite element analysis (FEA) method. Tubes with identical material properties and outer/inner diameters were used throughout the study, while the primary variation was introduced through the shock absorber mounting housing design. Accordingly, AISI 132 cast housing and 30CrMo4 forged housing were compared. Also, with shape optimizations. The analysis results indicate that the fork structure with a forged housing exhibits better fatigue performance. Under longitudinal loading conditions, the fatigue life of the cast housing configuration was found to be below 1 million cycles, whereas the forged housing design achieved significantly higher life values. Additionally, under accidental and incidental loading conditions, the plastic strain values observed in the forged configuration were lower. Although higher stress values were recorded in the forged design under maximum loading conditions, these stresses remained within elastic limits. The results demonstrate that the use of forging provides significant advantages in terms of fatigue life and structural reliability in steering fork designs for three-wheeler vehicles. This study highlights the critical role of material selection and manufacturing methods in the performance of key load-bearing components, and underlines the effectiveness of finite element analysis as a tool for evaluating such designs.

Keywords: Casting, Fatigue life, Finite element analysis, Forging, Steering fork.

1. GİRİŞ

Kentsel ulaşım sistemlerinin dönüşümü ve e-ticaretin hızlı büyümesiyle birlikte, üç tekerlekli mikromobilite araçları son kilometre lojistiği ve şehir içi yük taşımacılığında önemli bir yer edinmeye başlamıştır. Elektrikli tahrikli bu araçlar; düşük işletme maliyeti, sıfır emisyon ve trafik yoğunluğunun yüksek olduğu şehir içi ortamlarda etkin çalışma gibi avantajlar sunmaktadır. Küresel elektrikli üç tekerlekli araç pazarının 2024 yılında yaklaşık 1,9 milyar ABD doları büyüklüğe ulaştığı ve 2034 yılına kadar yıllık ortalama %6,7 oranında büyümesi öngörülmektedir (Global Market Insights, 2024). Bu büyüme eğilimi, taşıma kapasitesi gereksinimlerinin artması ve araçların daha ağır yük koşullarında çalıştırılmasıyla birlikte yapısal bileşenler üzerindeki mühendislik baskısını önemli ölçüde artırmaktadır.

Üç tekerlekli bir araçta ön direksiyon çatalı, mekanik açıdan en zorlu yapısal sistemler arasında yer almaktadır. Çatal, tekerlek yük yolunu araç gövdesine taşıyan birincil yapısal eleman olmanın yanı sıra amortisör bağlantı noktasını da bünyesinde barındırmaktadır. Bu nedenle çatal; yüksek genlikli düşey tekerlek yükleri, frenleme ve ivmeden kaynaklanan boylamsal kuvvetler ile viraj manevralarında oluşan yanıl kuvvetlere maruz kalmaktadır. Bu yüklerin tekrarlı doğası, yorulmayı servis ömrünü belirleyen baskın hasar mekanizması hâline getirmektedir (Lee ve diğerleri, 2005).

Direksiyon çatalı içinde amortisör bağlantı muhafazası, özellikle çevrimsel yükleme altında gerilme yoğunlaşmasının gerçekleştiği kritik bir bölgedir. Bu muhafaza için tercih edilen üretim yönteminin —döküm ya da dövme— bileşenin yorulma performansı üzerinde belirleyici bir etkisi bulunmaktadır.

Dövme işlemi; kontrollü basınç uygulamasıyla metalin tane yapısını inceltmekte, iç boşlukları ve kalıntıları ortadan kaldırmakta, yük yönüyle hizalı bir lifsel tane akışı oluşturmaktadır. Bu mikro yapısal özellikler, döküm bileşenlere kıyasla daha yüksek çekme mukavemeti, darbe tokluğu ve yorulma dayanımı sağlamaktadır. Williams ve Fatemi (2007), dövme çelik ve sfero dökme demir krank millerini karşılaştırdıkları çalışmada dövme çeliğin bileşen düzeyinde %32 daha yüksek yorulma mukavemeti ve altı kat daha uzun yorulma ömrü sergilediğini ortaya koymuştur.

Yapısalürde hafif kentsel araçların yapısal analizi kapsamında Blatnický ve diğerleri (2022), alışılmışın dışında bir ön tekerlek direksiyon mekanizmasına sahip üç tekerlekli araç gövdesini SEA ve çok eksenli yorulma deneyleriyle kapsamlı biçimde incelemiş; direksiyon mekanizmasının özgün hareket kabiliyetlerinin çerçeve ve kaynak bölgelerinde özgün gerilme koşullarına yol açtığını ve SEA tabanlı yapısal değerlendirmenin bu tür hafif araçlarda güvenilir bir yöntem olduğunu ortaya koymuştur. Zamzam ve diğerleri (2025) ise SEA tabanlı dinamik analizlerin elektrikli araç şasisi değerlendirmesinde hem statik hem de kazara yükleme senaryolarının birlikte ele alınmasının önemini vurgulamıştır. Liu ve diğerleri (2025), yağmur akışı yöntemiyle elde edilen yük spektrumlarını ve Miner birikimli hasar kuralını kullanan SEA tabanlı yorulma ömrü değerlendirmesinin, karmaşık direksiyon bileşenleri için mühendislik kalitesinde ömür tahminleri sunduğunu göstermiştir.

Mevcut literatürde üç tekerlekli araçlara özgü direksiyon çatalı muhafazalarında döküm ile dövme üretim yollarını karşılaştıran kapsamlı SEA çalışmaları oldukça sınırlıdır. Bu çalışma, söz konusu boşluğu doldurma amacıyla dört farklı direksiyon çatalı tasarım konfigürasyonunu —döküm ve dövme muhafaza varyantlarını, geometri optimize edilmiş bir yarı çatalı ve alternatif sac konstrüksiyon tipini— üç farklı yük durumu altında SEA ile karşılaştırmalı olarak değerlendirmektedir. Çalışma; eşdeğer gerilme seviyeleri, boylamsal yükleme altında yorulma ömrü tahmini ve kazara yükleme altında plastik deformasyon davranışını kapsamaktadır. Üretim yöntemi, ağırlık, yapısal kapasite ve paketleme kısıtlamaları arasındaki mühendislik değiş tokuşları, erken tasarım aşamasındaki karar süreçlerini desteklemek amacıyla tartışılmaktadır.

2. YÖNTEM

2.1. Tasarım Varyantları ve Modelleme Süreci

Bu çalışmada Tablo 1'de özetlenen dört temel direksiyon çatalı tasarım konfigürasyonu incelenmiştir. Temel karşılaştırma (V1 - V2), muhafaza üretim yönteminin etkisini yalıtım amacıyla her iki varyantta boru malzeme özellikleri, dış çap ve iç çap değerleri özdeş tutularak kurgulanmıştır. Bu tasarım sayesinde yapısal performanstaki farklılıklar yalnızca muhafaza üretim yöntemine bağlanabilmektedir.

Varyant V1, döküm alüminyum alaşımından (AISI 132) imal edilmiş döküm muhafaza kullanmaktadır. Varyant V2, EN 10083 standardına uygun (Alman DIN 17200 sınıfı) krom-molibden alaşımlı çelikten (30CrMo4) dövme olarak üretilmiş muhafazayı içermektedir. 30CrMo4, ısıtılma işlem sonrası yaklaşık 980 MPa çekme mukavemeti, üstün tokluk ve yüksek çevrimsel yük altında yorulma dayanımı ile öne çıkan bir su verme-temperleme çeliğidir (MakeItFrom.com, t.y.). Sıcak dövme işlemiyle oluşan yönlü tane yapısı, bu malzemeyi kritik yorulma bölgelerinde çatlak başlangıcına karşı özellikle dirençli kılmaktadır (Williams ve Fatemi, 2007).



Şekil 1. Güçlendirilmiş Dövme Gövdeli Yarıçatal

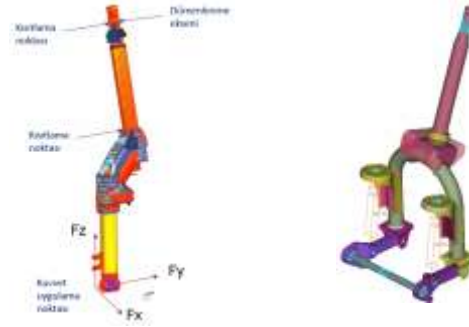
Varyant V3, dövme muhafaza yaklaşımını geometri optimizasyonu ile genişleten 'güçlendirilmiş dövme yarı çatal' (Şekil1) konfigürasyonudur. Bu varyantta V2'ye kıyasla boru dış çapı ve muhafaza boyutu yaklaşık %8 oranında artırılmış; bununla birlikte belirlenen sabit noktalar ve paketleme sınırları korunmuştur. Varyant V4 ise tek taraflı çatal konseptinin yerini alan, sac metal ve çok borulu yapısal elemanlardan oluşan kaynaklı ağır hizmet tipi mimariyi temsil etmektedir. Bu yapıda boru giriş bölgelerine göre, gövde bölgeleri %50 ek et kalınlığı uygulanarak kuvvet giriş noktalarındaki gerilme yoğunlaşması azaltılmıştır.

Tablo 1. Tasarım varyantlarına genel bakış.

Varyant	Muhafaza Üretim Yöntemi	Muhafaza Malzeme	Boru Konfigürasyonu	Mimari
V1 – Temel Döküm	Döküm	AISI 132 (döküm alaşım)	Standart Dış Çap / İç Çap — baz	Tek taraflı yarı çatal
V2 – Temel Dövme	Dövme	30CrMo4 (CrMo çelik)	V1 ile özdeş Dış Çap / İç Çap	Tek taraflı yarı çatal
V3 – Güçlend. Dövme	Dövme	30CrMo4 (CrMo çelik)	Büyütülmüş dış çap / ayarlı iç çap	Optimize edilmiş yarı çatal (~%8 artış)
V4 – Ağır Hizmet	Kaynaklı sac + boru	Yapısal çelik	Çok borulu; kalınlaştırılmış giriş	Tam genişlikli sac konstrüksiyon

2.2. Sınır Koşulları ve Yük Durumları

Kısıtlama noktaları, direksiyon direk yataklama bölgesinden uygulanmaktadır. Kuvvet uygulaması ise tekerlek ile çatal birleşim yataklama bölgesinden yapılmaktadır. (Şekil2) Varyantlar arasında karşılaştırılabilirliği sağlamak amacıyla V1, V2 ve V3'te sabit geometrik noktalar ve paketleme hacimleri aynı tutulmuştur. Üç yükleme durumu ele alınmıştır:



Şekil 2. Sınır koşulları ve yükleme durumu

- (a) Boylamsal yükleme — frenleme ve ivmeden kaynaklanan öne-arkaya kuvvetleri temsil etmektedir. Yol ölçüm verilerine ve ilgili standartlara göre F_x bileşeni uygulanmıştır. Bu yük durumu birincil yorulma sürücüsüdür; servis ömrü boyunca en yüksek gerilme çevrim sayısını üretmekte ve muhafaza bölgesinde maksimum gerilme genliğine yol açmaktadır.
- (b) Kazara / olay yüklemesi — yol kabarıkları veya bordür çarpmaları gibi nominal dışı veya aşırı yük koşullarını temsil etmektedir. Bu durum, F_y/F_z bileşenlerinin kombinasyonu ile değerlendirilmiş olup muhafaza bölgesinde oluşan plastik şekil değiştirme büyüklüğü üzerinden yapısal sağlamlık ölçülmüştür. Daha düşük plastik şekil değiştirme, daha üstün yapısal kaliteye işaret etmektedir.
- (c) Maksimum yükleme — tasarım yük zarfının en uç noktasını temsil eden tepe yük koşuludur. Bu durum; tasarımın pik yükleme altında elastik sınır içinde kalıp kalmadığını (akma olmadığını) doğrulamak ve statik mukavemet marjini belirlemek amacıyla uygulanmaktadır.

2.3. Sonlu Elemanlar Analizi Süreci

Tüm varyantların yapısal performans değerlendirmesi SEA yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. SEA; tasarım geliştirme sürecinin erken aşamalarında fiziksel prototip oluşturmada önce gerilme dağılımlarının tahmin edilmesine, kritik bölgelerin belirlenmesine, yorulma ömrünün kestirilmesine ve plastik deformasyon davranışının değerlendirilmesine olanak tanıyan endüstriyel standartta bir hesaplama yöntemidir (Liu ve diğerleri, 2025; Suresh, 1998). Bu yöntem, birden fazla tasarım varyantının özdeş sınır koşulları altında incelenebildiği karşılaştırmalı çalışmalar için özellikle elverişlidir.

Değerlendirme çerçevesi üç performans kriteri içermektedir. Birincisi, malzeme akma sınırına göre eşdeğer (von Mises) gerilmenin elastik ya da plastik alanda olup olmadığını belirlemek amacıyla kıyaslanmasıdır. İkincisi, birincil yorulma sürücüsü olan boylamsal yük durumu altında gerilme-ömür (S-N) yaklaşımıyla yüksek çevrim yorulması (HCF) ömrünün kestirilmesidir. Bu yaklaşım, baskın yükleme koşulunun yaklaşık 10^5 çevrim üzerindeki elastik alan gerilmelerini üretmesiyle uyumludur.

(Lee ve diğerleri, 2005; Suresh, 1998). Üçüncüsü ise kazara yükleme durumunda plastik şekil değiştirme büyüklüğünün kalıcı deformasyon kapasitesi ve yapısal sağlamlık göstergesi olarak değerlendirilmesidir.

Bu çalışmanın bir kısıtı olarak şunu belirtmek gerekir: Analizlerde kullanılan SEA çözücü konfigürasyonu, ağ yoğunluğu, detaylı sınır koşulları ve S-N eğrisi parametreleri kaynakçanın kapsamı dışındadır. Hesaplamalar özellikle varyantlar arası karşılaştırmalı değerlendirmeye yönelik olduğundan sonuçlar nicel mutlak değerler yerine niteliksel karşılaştırma şeklinde raporlanmaktadır. Ayrıca kaynaklı bölgelerdeki ısıdan etkilenen bölge (IAB) malzeme özellik gradyanları modellere dahil edilmemiştir.

3. BULGULAR

3.1. Döküm ile Dövme Muhafaza Karşılaştırması (V1 – V2)

Boylamsal yükleme altında döküm muhafazalı konfigürasyonun (V1) yorulma ömrünün bir milyon çevrimin altında kaldığı görülmüştür. Son kilometre lojistiği hizmetinde yoğun çalışma döngüsüyle önemli mesafeler kat etmesi beklenen bir üç tekerlekli araç için, bir milyon çevrim eşiğinin altında kalan bir yorulma ömrü yeterli tasarım marjini sunmamaktadır. Bu durum, tasarım modifikasyonu ya da uygulanan yük genliğinin düşürülmesini gerektirmektedir.

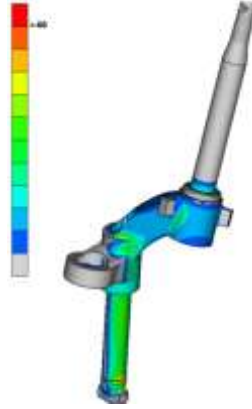
Tamamen özdeş boru geometrisi ve malzeme özellikleriyle değerlendirilen dövme muhafaza konfigürasyonu (V2), aynı boylamsal yük durumu altında belirgin biçimde daha yüksek yorulma ömrü elde etmiştir. Dövme çeliğin döküm alaşımlara kıyasla yorulma kritik uygulamalardaki üstünlüğüyle örtüşen bu sonuç, muhafaza üretim yolunun —ve yalnızca o değişkenin— çevrimsel dayanıklılık üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olduğunu açıkça ortaya koymaktadır (Williams ve Fatemi, 2007). Dövme işlemi; döküm bileşenlerdeki çatlak başlangıç odakları olan iç gözeneklilik ve rastgele tane yapısını ortadan kaldırarak yerlerine rafine edilmiş, hizalı bir mikro yapı koymaktadır.

Kazara yükleme koşullarında dövme konfigürasyondaki (V2) plastik şekil değiştirme değerleri döküm varyantına (V1) kıyasla ölçülebilir biçimde düşük çıkmıştır. Bu bulgu, aşırı yük olaylarında kalıcı deformasyona karşı daha üstün bir direncin varlığına işaret etmektedir. Maksimum yükleme altında ise dövme tasarım, döküm varyantına göre daha yüksek eşdeğer gerilme geliştirmiştir; bununla birlikte her iki konfigürasyon da elastik sınır içinde kalmış ve pik yükleme altında akmanın gerçekleşmediği doğrulanmıştır. V2'de gözlemlenen yüksek gerilme, 30CrMo4 dövme çeliğinin döküm alüminyum alaşımına kıyasla daha yüksek rijitliğinden kaynaklanmakta olup yapısal bir yetersizliğe değil, malzeme özelliğine işaret etmektedir.

3.2. Geometri Optimizasyonu Etkileri (V3)

Boru dış çapının yaklaşık %8 oranında büyütülmesi ve buna eşlik eden muhafaza boyutu artırımı (V3), belirlenen sabit geometrik noktalar ve paketleme sınırları korunarak baz yarı çatal yapısına (V1) kıyasla yaklaşık %40 aks yük kapasitesi iyileştirmesi sağlamıştır. Bu önemli bulguda temel mekanizma, boş dairesel kesitlerde kesit modülünün boru çapıyla doğrusal olmayan şekilde ölçeklenmesidir: %8'lik bir dış çap artışı, geometri–rijitlik ilişkisinin doğrusal olmayan yapısı nedeniyle sağlanan kapasite kazanımının bu geometrik değişiklikten orantısız biçimde büyük olmasına yol açmaktadır.

Aynı paketleme hacimleri içinde sabit noktalar korunarak optimum bir yapı boyutlandırması seçildiğinde, baz modele kıyasla yaklaşık %40 ek aks kapasitesi elde edilmektedir. Bu sonuç, boru kesit ölçeklendirmesinin yüksek kaldırma bir yapısal geliştirme eylemi olduğunu doğrulamakta; özellikle paketleme sabit noktaları henüz tam anlamıyla kilitlenmemiş erken tasarım aşamalarında bu optimizasyon yolunu cazip kılmaktadır.



Şekil 3. Dövme gövde yarı çatal mimari SEA sonuçları

Öte yandan, bu aşamada önemli bir sistem düzeyindeki değiş tokuşu vurgulamak gerekmektedir. Dövme versiyon, döküm alternatifine kıyasla yaklaşık %20 daha ağır bir yapı oluşturmaktadır. Toplam araç kütlesinin batarya menzili, yük kapasitesi ve sürüş deneyimi üzerinde doğrudan etkili olduğu hassas ağırlık bütçesine sahip mikromobilité uygulamalarında bu kütle artışı, araç sistem hedefleri karşısında açıkça değerlendirilmelidir. Bu nedenle dövme yoluna geçiş kararı verilmeden önce program düzeyinde bir malzeme–imalat değerlendirme analizi yapılması tavsiye edilmektedir (Şekil 3).

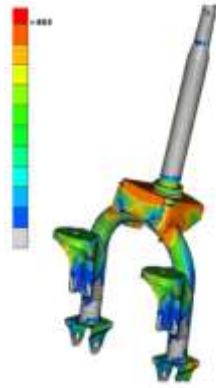
Tablo 2. Varyant ve yük durumuna göre yapısal performans özeti.

Varyant	Yük Durumu	Gerilme Durumu	Yorulma Ömrü / Kapasite	Plastik Şekil Değ.
V1 – Temel Döküm	Boylamsal	Orta düzey	1 milyon çevrim altı — yorulma kritik	Referans seviyesi
V2 – Temel Dövme	Boylamsal	Yüksek; elastik	1 milyon çevrimin belirgin üstü	V1'den düşük
V2 – Temel Dövme	Kazara	Elastik sınır içinde	Değerlendirilmedi	V1'den ölçülebilir düşük
V2 – Temel Dövme	Maksimum	Yüksek; elastik	Akma gerçekleşmedi	İhmal edilebilir
V3 – Güçl. Dövme	Maksimum	En yüksek; elastik	V1 bazına kıyasla ~%40 kapasite artışı	Kabul edilebilir
V4 – Ağır Hizmet	Tüm durumlar	Çok bölgeli; elastik	V1 bazına kıyasla ~%60 kapasite artışı	Alt bileşenlerde düşük

3.3. Ağır Hizmet Tipi Sac Konstrüksiyon Mimarisi (V4)

Kaynaklı sac metal ve çok borulu yapısal elemanları bir araya getiren ağır hizmet tipi mimari (V4), sağlamlık odaklı bir alternatif olarak değerlendirilmiştir. Bu yapı, baz çizgiye kıyasla yaklaşık %60 daha yüksek aks yük kapasitesi sağlamakta ve bu çalışmada incelenen varyantlar arasında en büyük yapısal marjin artışını sunmaktadır.

Elde edilen kapasite iyileşmesinin yapısal temeli, V4 mimarisinin tam genişlikli konfigürasyonunda yatmaktadır: tekerlek tepki kuvveti tek yerine iki yük yolu üzerinden taşınmakta, kaynaklı çok borulu çerçeve kapalı veya yarı kapalı bir yapısal döngü oluşturmaktadır. Genel yapısal mühendislik ilkeleri çerçevesinde dağıtılmış yük yolları ve kapalı kesitli yapısal elemanlar, tek kollu veya açık kesitli konfigürasyonlara kıyasla daha yüksek statik mukavemet ve yorulma dayanımı sunmaktadır. Ağır hizmet sistem mimarisinde yüksek toplam yapısal ağırlık göz önüne alındığında, direksiyon mili ile U profil birleşim bölgesinde braket yerine dövme konstrüksiyon kullanılması kuvvetli bir yapısal tercih olarak öne çıkmaktadır. (Şekil-4)



Şekil 4. Ağır Hizmet Tipi Mimari Çatal SEA sonuçları

V4 mimarisi, salıncak kolu hareket zarfı, tekerlek hizalama geometrisi ve tekerlek yol gerekliliklerini uygun modül konumlandırması ve braket tasarımı aracılığıyla karşılamaktadır. Tablo 3, ağır hizmet tipi montaj bileşenlerinin yapısal işlevleriyle birlikte listesini vermektedir.

Tablo 3. V4 ağır hizmet tipi mimarisi bileşen listesi.

Bileşen	Yapısal İşlev
Modül tutucusu / braket	Çatal modülü ile araç gövdesi arasındaki birincil bağlantı; aks yüklerini şasiye dağıtır
U-taşıyıcı bağlantı braket	U-taşıyıcı alt sistemini ana yapısal döngüye bağlar; alt sistemler arası yük aktarımını yönetir
Salıncak kolu / braketleri	Tekerlek hareket kinematiğini yönetir; süspansiyon tepki kuvvetlerini yapısal çerçeveye iletir
U-taşıyıcı gövdesi	U-taşıyıcı alt sisteminin merkezi göbek elemanı; aks ve süspansiyon bağlantı noktalarını entegre eder
U boru bağlantısı	Montajın birincil yük taşıyıcı boru elemanı; baskın eksenel ve eğilme yüklerini taşır
Üst boru bağlantısı	Üst yapısal bağlantı elemanı; önden arkaya rijitlik ve düzlem dışı kararlılık sağlar
Toplam montaj	Çok bileşenli kaynaklı yapı (kütle verileri gizlilik kapsamındadır)

4. SONUÇ VE TARTIŞMA

Bu çalışma; amortisör bağlantı muhafazası üretim yönteminin, üç tekerlekli mikromobilité araçlarında direksiyon çatalının yapısal performansını belirleyen temel değişken olduğunu SEA tabanlı karşılaştırmalı değerlendirme yoluyla ortaya koymuştur. Boru geometrisi ve malzeme özellikleri sabit tutulduğunda döküm'den dövme'ye geçiş, boylamsal yükleme altında yorulma ömründe belirgin bir iyileşme ve kazara yükleme koşullarında plastik şekil değiştirme azalması sağlamaktadır. Sadece muhafaza üretim yolunun değiştirilmesiyle elde edilen bu farklılıklar, dövme işleminin sağladığı rafine tane yapısının döküm alaşımına kıyasla üstünlüğünü açıkça doğrulamakta; muhafaza seçimini erken aşama tasarım kararının birincil değişkeni olarak konumlandırmaktadır (Williams ve Fatemi, 2007).

Geometri optimizasyonu, paketleme açısından verimli tamamlayıcı bir iyileştirme yolu sunmaktadır. Yaklaşık %8'lik dış çap ve muhafaza büyütmesi, paketleme ayak izini değiştirmeksizin yaklaşık %40 kapasite artışı sağlamaktadır. Boru kesit ölçeklendirmesinin yüksek kaldıraçlı bir yapısal geliştirme eylemi olduğunu doğrulayan bu sonuç, sabit noktaların henüz kesinleşmediği erken tasarım aşamalarında bu optimizasyon yolunu özellikle çekici kılmaktadır. Geometri iyileştirmesinin üretim yolu bağımsız olması da önemli bir avantajdır: söz konusu iyileştirme döküm ve dövme muhafaza varyantlarına eşit ölçüde uygulanabilmektedir.

Dövme çelik ile döküm alüminyum arasındaki temel sistem düzeyi değiş tokuşu küttedir: dövme konfigürasyon yaklaşık %20 daha ağırdır. Bu kütle cezası, toplam araç kütlelerinin batarya menzili ve taşıma kapasitesi üzerinde doğrudan belirleyici olduğu ağırlığa duyarlı uygulamalarda dikkatle değerlendirilmesi gereken bir parametredir. Bu bağlamda, dövme yaklaşımına geçiş yapılmadan önce sistem düzeyinde malzeme–imalat değiş tokuş analizinin yapılması tavsiye edilmektedir.

En yüksek yapısal marjini sunan ağır hizmet tipi sac konstrüksiyon mimarisi (V4), baz çizgiye kıyasla yaklaşık %60 daha fazla aks kapasitesi sağlamaktadır. Yük taşıma kapasitesinin en kritik gereksinim olduğu ve kütle bütçesinin daha az kısıtlayıcı olduğu yüksek taşıma kapasiteli araçlar için bu mimari en

uygun çözümü temsil etmektedir. Bu mimari kapsamında, ağır hizmet sisteminde yüksek toplam yapısal ağırlık göz önüne alındığında direksiyon mili ile U profil birleşim bölgesinde braket yerine dövme konstrüksiyon kullanılması güçlü bir tercih olarak öne çıkmaktadır.

Bu çalışmanın sınırlılıkları şunlardır: SEA çözücü parametreleri, ağ yapılandırması ve malzeme yorulma eğrisi girdileri tam olarak açıklanamamıştır; kaynaklı bölgelerdeki ısıdan etkilenen bölge özellik gradyanları modellere dahil edilmemiştir. Gelecek çalışmalarda deneysel olarak doğrulanmış yorulma eğrilerinin, ağ duyarlılığı analizlerinin ve fiziksel prototip test korelasyonunun sisteme entegre edilmesi, hesaplamalı ömür tahmin güvenilirliğini artıracaktır. Nihai tasarım kararında yapısal performansın yanı sıra maliyet ve üretilebilirlik kriterlerinin de birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir.

KAYNAKÇA

- Blatnický, M., Dižo, J., Molnár, D., & Suchánek, A. (2022). Comprehensive analysis of a tricycle structure with a steering system for improvement of driving properties while cornering. *Materials*, 15(24), 8974. <https://doi.org/10.3390/ma15248974>
- Global Market Insights. (2024). Electric three-wheeler market size, share and growth analysis, 2025–2034. <https://www.gminsights.com/industry-analysis/electric-three-wheeler-market>
- Lee, Y.-L., Pan, J., Hathaway, R., & Barkey, M. E. (2005). *Fatigue testing and analysis: Theory and practice*. Elsevier Butterworth-Heinemann.
- MakeItFrom.com. (t.y.). EN 1.7216 (30CrMo4) chromium-molybdenum steel. <https://www.makeitfrom.com/material-properties/EN-1.7216-30CrMo4-Chromium-Molybdenum-Steel>
- Liu, Y., Gao, X., Huang, H., & Tan, J. (2025). Finite element analysis and optimization of steering axle structure for new energy vehicles. *Symmetry*, 17(11), 1882. <https://doi.org/10.3390/sym17111882>
- Suresh, S. (1998). *Fatigue of materials* (2nd ed.). Cambridge University Press.
- Williams, J., & Fatemi, A. (2007). Fatigue performance of forged steel and ductile cast iron crankshafts. *SAE Technical Paper 2007-01-1001*. <https://doi.org/10.4271/2007-01-1001>
- Zamzam, O., Ramzy, A. A., Abdelaziz, M., Elnady, T., & Abd El-Wahab, A. A. (2025). Structural performance evaluation of electric vehicle chassis under static and dynamic loads. *Scientific Reports*, 15, 5067. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-86924-w>

Elektrikli Araçlarda Düz Taban Mimarisi ve İç Mekân Algısı

Enes CEBE

enes.cebe@tofas.com.tr; TOFAŞ Türk Otomobil Fabrikası A.Ş., R&D Center, Bursa/ Türkiye.

Özet

Elektrikli araç mimarisi, otomotiv sektöründe yalnızca güç aktarım sistemini değil, kullanıcıların araç iç mekânını algılama biçimini de dönüştürmüştür. İçten yanmalı araçlarda merkezi tünel çoğunlukla mekanik yerleşim gereksinimlerinin sonucu olarak ortaya çıkarken, elektrikli araçlarda batarya paketinin alt gövdeye entegre edilmesi daha düz bir kabin zemini oluşturma olanağı sağlamıştır. Bu çalışma, düz orta taban yaklaşımını müşteri algısı açısından değerlendirmektedir. Literatür araştırmasına dayanan çalışmada, düz taban mimarisinin ferahlık hissi, erişilebilirlik, iç mekân esnekliği, modernlik algısı ve algılanan ürün değeri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bulgular, düz orta tabanın müşteride daha açık, daha sade ve daha yenilikçi bir kabin algısı oluşturduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, bu yaklaşımın sayısal kazanımlarının araç mimarisine bağlı olduğu; iç hacim ve kullanım algısı açısından çoğunlukla olumlu sonuç üretirken, taban yüksekliği ve oturma düzeni kötü optimize edildiğinde bazı paketleme ödünleşimleri doğurabildiği anlaşılmaktadır. Sonuç olarak düz orta taban yaklaşımı, yalnızca teknik bir gövde kararı değil, müşteri deneyimini güçlendiren önemli bir tasarım stratejisidir.

Anahtar Kelimeler: alt gövde mimarisi, düz taban, elektrikli araç, iç mekân deneyimi, müşteri algısı

Abstract

Electric vehicle architecture has transformed not only the powertrain system in the automotive industry but also the way users perceive the vehicle interior. While the central tunnel in internal combustion engine vehicles mainly emerged from mechanical packaging requirements, the integration of the battery pack into the underbody in electric vehicles has enabled a flatter cabin floor. This study evaluates the flat mid-floor approach from the perspective of customer perception. Based on a literature review, the study examines the effects of flat-floor architecture on spaciousness, accessibility, interior flexibility, modernity perception and perceived product value. The findings indicate that a flat mid-floor creates a more open, simpler and more innovative cabin perception for customers. However, the numerical benefits of this approach vary depending on vehicle architecture; although it generally improves perceived roominess and usability, poor optimization of floor height and seating layout may also create packaging trade-offs. As a result, the flat mid-floor approach should be considered not only as a technical body decision but also as a significant design strategy that strengthens customer experience.

Keywords: customer perception, electric vehicle, flat floor, interior experience, underbody architecture

GİRİŞ

Elektrikli araçlar, otomotiv sektöründe yalnızca güç aktarma sistemi açısından değil, araç mimarisi ve iç mekân tasarımı açısından da önemli bir dönüşüm yaratmaktadır. Geleneksel içten yanmalı motorlu araçlarda motor, şanzıman, egzoz hattı ve aktarma organları nedeniyle araç tabanında belirgin bir orta tünel yapısı bulunur. Bu yapı, özellikle arka sıra yolcu konforu, ayak alanı, orta yolcu oturma rahatlığı ve kabin içi kullanım esnekliği üzerinde sınırlayıcı etki oluşturur.

Batarya elektrikli araçlarda ise enerji depolama sistemi çoğunlukla araç tabanına entegre edilen geniş batarya paketiyle sağlanır. Bu yaklaşım, otomotiv literatüründe çoğu zaman “skateboard platform” veya batarya-alt gövde entegrasyonu olarak tanımlanmaktadır. Batarya paketinin taban bölgesine yerleştirilmesi, araç ağırlık merkezinin düşürülmesine, yapısal paketleme alanının yeniden tanımlanmasına ve kabin içinde daha düz bir zemin elde edilmesine olanak tanır. Belingardi ve Scattina, batarya paketinin alt gövde yapısına entegrasyonunun BEV gövde mimarisi açısından önemli yapısal değişiklikler gerektirdiğini ve bataryanın yolcu bölmesi altında konumlandırılmasının koruma, servis edilebilirlik ve araç dinamiği açısından avantajlar sunduğunu belirtmektedir (Belingardi & Scattina, 2023).

Düz taban mimarisi, elektrikli araçlarda yalnızca teknik bir paketleme sonucu değil, aynı zamanda kullanıcı deneyimini etkileyen bir iç mekân tasarım parametresi olarak değerlendirilmektedir. İç mekân ferahlığı, algılanan hacim, erişilebilirlik, oturma düzeni, modüler kabin kullanımı ve dijital kokpit tasarımı bu mimariden doğrudan etkilenebilen alanlardır. Shen’in elektrikli araç iç tasarımı üzerine yaptığı çalışmada, kullanıcıların EV iç mekân tercihleri estetik, yenilik, teknoloji ve sürdürülebilirlik gibi faktörler üzerinden ele alınmaktadır. Bu durum, elektrikli araçlarda iç mekânın artık yalnızca ergonomik bir alan değil, kullanıcı algısını ve satın alma değerlendirmesini etkileyen stratejik bir tasarım unsuru olduğunu göstermektedir (Shen, 2025).

Bu çalışma, elektrikli araçlarda düz taban mimarisi ile iç mekân algısı arasındaki ilişkiyi mevcut literatür üzerinden incelemeyi amaçlamaktadır. Çalışma kapsamında herhangi bir deneysel uygulama, sayısal modelleme veya yeni test verisi sunulmamaktadır. Bunun yerine, konuya ilişkin akademik ve sektörel kaynaklar tematik olarak değerlendirilerek literatürde öne çıkan ortak bulgular ortaya konmaktadır.

YÖNTEM

Bu çalışma, nitel bir literatür taraması olarak yapılandırılmıştır. Araştırma kapsamında elektrikli araç mimarisi, düz taban tasarımı, batarya-alt gövde entegrasyonu, iç mekân ferahlığı, algılanan iç hacim, kullanıcı deneyimi ve elektrikli araç iç tasarım eğilimleri ile ilişkili akademik yayınlar ve sektörel raporlar incelenmiştir.

- Literatür taramasında özellikle şu konu başlıklarına odaklanılmıştır:
- Elektrikli araçlarda batarya paketi ve alt gövde entegrasyonu,
- Düz taban mimarisinin kabin yerleşimine etkisi,
- Araç iç mekânında fiziksel ve algısal ferahlık kavramı,
- Elektrikli araç kullanıcılarının iç tasarım beklentileri,

- Geleceğe yönelik modüler, dijital ve kullanıcı odaklı kabin tasarımı yaklaşımları.

Kaynak seçiminde 2015 sonrası yayımlanan çalışmalar öncelikli olarak değerlendirilmiştir. Bunun nedeni, elektrikli araç mimarisinin özellikle son yıllarda batarya paketleme, platform tasarımı ve iç mekân deneyimi bakımından hızlı bir gelişim göstermesidir. Bununla birlikte, algılanan iç hacim ve ferahlık konularında daha eski ancak konu açısından doğrudan ilişkili çalışmalar da literatür kapsamında dikkate alınmıştır.

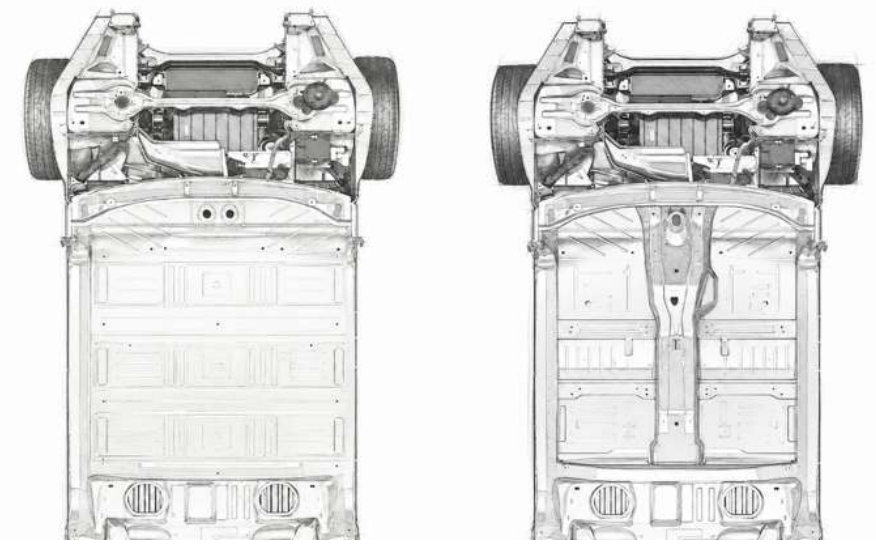
Çalışma kapsamında elde edilen kaynaklar, içeriklerine göre tematik olarak sınıflandırılmıştır. Bu temalar; düz taban mimarisi ve iç mekân etkileri, kullanıcı tercihleri ve tasarım faktörleri, elektrikli araç pazar eğilimleri ve geleceğe yönelik tasarım yaklaşımları şeklinde düzenlenmiştir. Bu yöntem sayesinde çalışma, belirli bir hipotezi test etmek yerine mevcut literatürdeki ortak eğilimleri ve araştırma boşluklarını ortaya koymayı hedeflemektedir.

BULGULAR

Düz Taban Mimarisi ve İç Mekân Etkileri

Literatürde elektrikli araç mimarisinin iç mekân tasarımına en önemli katkılarından biri, daha düz bir kabin tabanı oluşturma potansiyeli olarak değerlendirilmektedir. İçten yanmalı motorlu araçlarda orta tünel yapısı çoğunlukla mekanik aktarım gerekliliklerinden kaynaklanırken, elektrikli araçlarda bu gereklilik büyük ölçüde ortadan kalkmaktadır. Bu durum, özellikle arka sıra yolcu alanı, orta koltuk kullanımı, ayak konforu ve kabin içi hareket serbestliği açısından avantaj yaratmaktadır.

Batarya paketinin araç tabanına entegre edilmesi, alt gövde mimarisinin yeniden ele alınmasını gerektirir. Belingardi ve Scattina'nın çalışmasında, batarya paketinin BEV gövde yapısına entegrasyonu; yapısal dayanım, darbe koruması, ağırlık merkezi ve servis edilebilirlik gibi mühendislik kriterleri açısından incelenmektedir. Bu yaklaşım, düz taban mimarisinin yalnızca iç mekân tasarımıyla değil, aynı zamanda gövde yapısı, güvenlik ve araç dinamiğiyle de ilişkili olduğunu göstermektedir (Belingardi & Scattina, 2023).



Şekil 1. Düz Taban vs. Tünele sahip Taban Çizimi

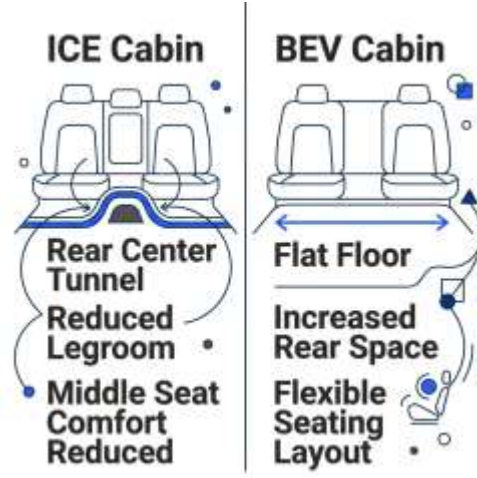
Şekil 1’de de görüldüğü üzere düz taban mimarisi, kabin içinde daha sade ve kesintisiz bir zemin algısı oluşturur. Bu durum fiziksel alan artışının yanında psikolojik ferahlık algısını da destekleyebilir. Araç iç mekânında algılanan hacim yalnızca ölçülebilir boyutlara bağlı değildir; tasarım çizgileri, yüzey sürekliliği, renk kullanımı, ışık dağılımı ve görsel engellerin azaltılması da ferahlık algısını etkileyebilir. Yang ve Ahn’ın algılanan araç iç hacmi üzerine yaptığı çalışma, optik illüzyon ve tasarım elemanlarının araç içindeki ferahlık algısını artırmak için kullanılabileceğini göstermektedir (Yang & Ahn, 2015).

Bu bağlamda düz taban mimarisi, yalnızca taban yüksekliği veya tünel yokluğu açısından değil, kabinin bütünsel algısı açısından da önemlidir. Düz ve kesintisiz bir zemin, kullanıcıya daha geniş, daha erişilebilir ve daha modern bir iç mekân deneyimi sunabilir. Bu nedenle literatürde düz taban mimarisi, elektrikli araçlarda kullanıcı odaklı iç mekân tasarımının temel bileşenlerinden biri olarak değerlendirilmektedir.

Tüketici Tercihleri ve Tasarım Faktörleri

Elektrikli araç kullanıcılarının tercihlerini inceleyen literatür, tüketicilerin yalnızca menzil, fiyat veya şarj süresi gibi teknik parametrelere değil, aynı zamanda araç tasarımına ve iç mekân deneyimine de önem verdiğini göstermektedir. Liao, Molin ve van Wee tarafından yayımlanan kapsamlı literatür taramasında, elektrikli araç tercihlerini etkileyen faktörler arasında araç özellikleri, kullanıcı profili, maliyet, şarj altyapısı ve çevresel tutumlar birlikte ele alınmaktadır (Liao, Molin, & van Wee, 2017).

Daha güncel sektörel araştırmalar ise elektrikli araç satın alma kararlarında tasarımın etkisinin arttığını göstermektedir. Escalent’in EVForward 2025 Product DeepDive çalışmasında, katılımcıların BEV tercihinde iç tasarımı %49 oranında önemli bir motivasyon olarak gördüğü belirtilmektedir (Escalent, 2026). Aynı çalışmada dış tasarım da %45 oranında öne çıkmış; bu sonuçlar, tasarımın elektrikli araç satın alma değerlendirmesinde teknik özelliklerle birlikte güçlü bir karar faktörü haline geldiğini göstermiştir.



Şekil 2. Tünele sahip bir gövde ile düz taban sahip bir gövdenin karşılaştırılması

Şekil 2’de de görüldüğü üzere iç mekân tasarımının tüketici tercihleri üzerindeki etkisi, düz taban mimarisi açısından doğrudan önemlidir. Çünkü düz taban; daha ferah ayak alanı, daha sade zemin geçişi, modüler oturma düzeni ve daha esnek konsol tasarımı gibi kullanıcı tarafından algılanabilen faydalar sunar. Shen’in elektrikli araç iç tasarımına ilişkin çalışması, EV iç mekânının kullanıcılar tarafından yenilikçi, teknolojik ve sürdürülebilir bir deneyim alanı olarak değerlendirildiğini ortaya koymaktadır (Shen, 2025).

Bu bulgular, elektrikli araçlarda düz taban mimarisinin yalnızca mühendislik paketleme avantajı olmadığını; aynı zamanda kullanıcı algısına, marka algısına ve ürün çekiciliğine katkı sağlayabilecek bir tasarım unsuru olduğunu göstermektedir.

Elektrikli Araç Pazar Eğilimleri

Elektrikli araç pazarındaki büyüme, araç mimarilerinin ve iç mekân kurgularının yeniden tasarlanmasını hızlandırmıştır. BEV platformlarında batarya paketinin taban altında konumlandırılması, üreticilere geleneksel içten yanmalı araçlardan farklı bir kabin düzeni oluşturma fırsatı vermektedir. Bu durum, özellikle kompakt sınıf araçlarda iç mekân verimliliğini artırmak için önemli bir avantaj olarak değerlendirilmektedir.

Literatürde elektrikli araç kullanıcı kabulü çoğunlukla menzil, batarya maliyeti, şarj altyapısı ve toplam sahip olma maliyeti üzerinden incelenmektedir. Ancak son yıllarda tasarım, kullanıcı deneyimi ve iç mekân algısı da elektrikli araçların pazardaki konumlanmasında daha görünür hale gelmiştir. Escalent’in güncel araştırması, BEV alıcılarının tasarım beklentilerinin teknik özelliklerle rekabet edecek seviyeye geldiğini göstermektedir.

Düz taban mimarisi, bu pazar eğilimi içinde önemli bir tasarım aracı olarak öne çıkmaktadır. Çünkü elektrikli araçlar, geleneksel araçlara kıyasla daha sessiz, daha dijital ve daha sade bir kullanıcı deneyimi vadetmektedir. Düz tabanlı kabin yapısı da bu deneyimin fiziksel karşılığını oluşturur. Kullanıcı, kabine girdiğinde daha açık, bölünmemiş ve modern bir iç mekân algısıyla karşılaşır. Bu nedenle düz taban

mimarisi, elektrikli araçların yalnızca teknik dönüşümünü değil, kullanıcıya sunulan mekânsal deneyim dönüşümünü de temsil eder.

Geleceğe Yönelik Tasarım Yaklaşımları

Elektrikli araç iç mekân tasarımına ilişkin güncel literatür, gelecekte kabinlerin daha modüler, daha dijital ve daha kullanıcı odaklı hale geleceğini göstermektedir. Düz taban mimarisi, bu dönüşüm için uygun bir fiziksel temel sunar. Orta tünelin ortadan kalkması veya azaltılması, ön konsol, orta konsol, koltuk yerleşimi ve arka sıra kullanımında daha esnek çözümlere olanak tanır.

Geleceğe yönelik elektrikli araç kabinlerinde sürdürülebilir malzeme kullanımı, dijital gösterge sistemleri, bağlantılı kullanıcı arayüzleri, artırılmış gerçeklik tabanlı bilgi sunumu ve modüler oturma düzenleri gibi yaklaşımlar öne çıkmaktadır. Bu eğilimler, iç mekânın yalnızca sürüş odaklı bir alan olmaktan çıkarak dinlenme, çalışma, etkileşim ve kişiselleştirilmiş deneyim alanı haline gelebileceğini göstermektedir.

Liu ve çalışma arkadaşlarının yolcu aracı iç mekânı üzerine yaptığı çalışma, araç iç mekânının büyüyebilir/geliştirilebilir bir tasarım yaklaşımıyla ele alınabileceğini ve kullanıcı deneyiminin farklı kullanım senaryolarına göre şekillendirilebileceğini göstermektedir (Liu, Zhang, Li, & Wang, 2024). Bu yaklaşım, düz taban mimarisinin gelecekte yalnızca daha geniş ayak alanı sağlamakla sınırlı kalmayacağını; aynı zamanda değişken kabin düzenleri, yeni nesil koltuk sistemleri ve kullanıcı odaklı iç mekân senaryoları için altyapı oluşturabileceğini göstermektedir.

Bununla birlikte, düz taban mimarisinin tüm araç sınıflarında aynı seviyede uygulanabilir olmadığı da dikkate alınmalıdır. Batarya kalınlığı, gövde rijitliği, yandan darbe performansı, zemin yüksekliği, koltuk H-point konumu ve üretim maliyeti gibi mühendislik parametreleri bu mimarinin sınırlarını belirler. Bu nedenle gelecekteki çalışmalarda düz taban mimarisinin yalnızca kullanıcı algısı açısından değil, yapısal güvenlik, ergonomi, NVH, üretilebilirlik ve maliyet açısından da bütünlük olarak değerlendirilmesi gerekmektedir.

SONUÇ VE TARTIŞMA

Bu çalışma, elektrikli araçlarda düz taban mimarisinin iç mekân algısı üzerindeki etkilerini mevcut literatür üzerinden değerlendirmiştir. İncelenen kaynaklar, düz taban mimarisinin yalnızca batarya paketleme veya alt gövde tasarımıyla ilgili teknik bir sonuç olmadığını; aynı zamanda kullanıcı deneyimi, iç mekân ferahlığı, erişilebilirlik, tasarım esnekliği ve yenilik algısı açısından önemli bir faktör olduğunu göstermektedir (Belingardi & Scattina, 2023; Shen, 2025; Yang & Ahn, 2015).

Literatürde öne çıkan temel eğilimlerden biri, elektrikli araçlarda iç mekânın kullanıcı tercihleri üzerindeki etkisinin giderek artmasıdır. Kullanıcılar elektrikli araçları değerlendirirken yalnızca menzil, şarj süresi veya maliyet gibi teknik parametrelere değil, aynı zamanda kabin tasarımı, ferahlık hissi ve kullanım konforuna da önem vermektedir (Escalent, 2026; Liao et al., 2017). Bu kapsamda düz taban mimarisi, elektrikli araçların geleneksel araçlardan ayrışmasını sağlayan önemli bir iç mekân avantajı olarak değerlendirilebilir.

Düz taban mimarisi, özellikle arka sıra yolcu konforu, orta yolcu ayak alanı, kabin içi hareket kolaylığı ve modüler iç mekân kurgusu açısından potansiyel faydalar sunmaktadır. Ancak bu mimarinin uygulanması, yalnızca kabin tasarımı açısından değil, alt gövde rijitliği, batarya koruması, yandan darbe güvenliği, zemin yüksekliği ve üretim maliyeti gibi mühendislik gereklilikleriyle birlikte ele alınmalıdır. Bu nedenle düz taban mimarisi, tasarım ve mühendislik disiplinlerinin birlikte değerlendirilmesini gerektiren çok boyutlu bir konu olarak görülmelidir.

Sonuç olarak, mevcut literatür elektrikli araçlarda düz taban mimarisinin iç mekân algısını olumlu yönde etkileyebilecek güçlü bir tasarım girdisi olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, konuya ilişkin çalışmaların önemli bir bölümü genel iç mekân tasarımı, tüketici tercihi veya batarya entegrasyonu başlıkları altında ele alınmaktadır. Düz taban mimarisi ile kullanıcı algısı arasındaki ilişkiyi doğrudan inceleyen çalışmaların sınırlı olması, bu alanda yeni araştırmalara ihtiyaç olduğunu göstermektedir. Gelecekte yapılacak çalışmaların kullanıcı deneyimi testleri, sanal gerçeklik destekli kabin değerlendirmeleri, ergonomik ölçümler ve araç sınıfı bazlı karşılaştırmalarla desteklenmesi literatüre katkı sağlayacaktır.

KAYNAKÇA

Belingardi, G., & Scattina, A. (2023). Battery pack and underbody: Integration in the structure design for battery electric vehicles—Challenges and solutions. *Vehicles*, 5(2), 498–514.

Escalent. (2026). Seven in ten BEV buyers demand style over specs. *EVForward 2025 Product DeepDive*.

Liao, F., Molin, E., & van Wee, B. (2017). Consumer preferences for electric vehicles: A literature review. *Transport Reviews*, 37(3), 252–275.

Liu, Z., Zhang, Y., Li, Y., & Wang, J. (2024). Growable design of passenger vehicle interior space based on user needs. *Scientific Reports*, 14.

Shen, K.-S. (2025). Exploring the appeal of electric vehicle interior design from the perspective of innovation. *World Electric Vehicle Journal*, 16(9), 527.

Yang, S., & Ahn, B. (2015). Perceived interior space of motor vehicles based on illusory design elements. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*, 25(5).

Investigation of Battery Mounting Types and Advantages of Battery Tray in Vehicle Engine Compartments

Mücella Gümüő¹, Enes CEBE²

¹Mucella.Gumus@tofas.com.tr; TOFAş Türk Otomobil Fabrikası A.ő. Ar-Ge Merkezi, Bursa/ Türkiye.

²enes.cebe@tofas.com.tr; TOFAş Türk Otomobil Fabrikası A.ő. Ar-Ge Merkezi, Bursa/ Türkiye.

Özet

Otomotiv aküleri; motorun ilk çalıştırılması ile çeşitli elektrikli ve elektronik sistemlerin beslenmesi için elektrik enerjisi sağlayan kritik bileşenlerdir. İçten yanmalı motorlu araçlarda akü genellikle motor bölmesinde konumlandırılır ve araç gövdesine bağlı bir akü tablası üzerine monte edilir. Araç kullanımı sırasında akü; titreşim, mekanik şoklar, termal yükler ve yol kaynaklı dinamik kuvvetlere maruz kalır. Bu nedenle akünün, operasyonel güvenliği, elektriksel güvenilirliği ve parça dayanımını sağlamak amacıyla akü tablasına güvenli şekilde sabitlenmesi gerekir. Otomotiv tasarımında; araç tipi, paketleme kısıtları, titreşim gereksinimleri ve servis erişilebilirliğine bağlı olarak çeşitli akü montaj teknikleri kullanılmaktadır. Yaygın akü sabitleme yöntemleri arasında alt kelepçeli montaj sistemleri, üst kelepçeli veya travers bağlantılı montaj sistemleri, çerçeve tipi akü tutucuları ve kayış bazlı sabitleme sistemleri yer almaktadır. Her bir montaj konfigürasyonu; montaj verimliliği, titreşim direnci, üretim maliyeti ve bakım erişilebilirliği açısından farklı avantajlar sunmaktadır. Bu çalışma, otomotiv endüstrisinde yaygın olarak kullanılan akü montaj tiplerini incelemekte ve bu sistemlerin yapısal özellikleri ile avantajlarını analiz etmektedir. Ayrıca farklı araç üreticilerine ait üç farklı araç platformu, motor bölmesindeki akü montaj stratejileri açısından değerlendirilmektedir. Sonuçlar, alt kelepçeli sistemlerin montaj kolaylığı ve servis edilebilirlik avantajları nedeniyle binek araçlarda yaygın olarak kullanıldığını; üst kelepçeli ve çerçeve tipi sistemlerin ise ağır hizmet tipi veya yüksek titreşimli uygulamalarda tercih edildiğini göstermektedir. Kayış bazlı sistemler ise genellikle hafif tasarımlarda veya özel araç mimarilerinde kullanılmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Akü montaj sistemleri, akü tablası, motor bölmesi, otomotiv aküsü, titreşim dayanımı

Abstract

Automotive batteries are critical components that provide electrical energy for starting the engine and powering various electrical and electronic systems. In internal combustion vehicles, the battery is generally located in the engine compartment and mounted on a battery tray connected to the vehicle's body. During vehicle operation, the battery is exposed to vibration, mechanical shocks, thermal loads, and road-induced dynamic forces. Therefore, the battery must be securely fixed to the battery tray to ensure operational safety, electrical reliability, and component durability. In automotive design, several battery mounting techniques are used depending on the vehicle type, packaging constraints, vibration requirements, and service accessibility. Common battery fixation methods include bottom clamp mounting systems, top clamp or crossbar mounting systems, frame-type battery holders, and strap-based mounting systems. Each mounting configuration offers different advantages in terms of

assembly efficiency, vibration resistance, manufacturing cost, and maintenance accessibility. This study examines commonly used battery mounting types in the automotive industry and analyzes their structural characteristics and advantages. In addition, different vehicle platforms referred to as OEM 1, OEM 2, and OEM 3 are analyzed in terms of their battery mounting strategies in engine compartments. The results indicate that bottom clamp systems are widely used in passenger vehicles due to ease of assembly and serviceability, whereas top clamp and frame-type systems are preferred in heavy-duty or high-vibration applications. Strap-based systems are generally used in lightweight designs or special vehicle architectures.

Keywords: Automotive battery, battery tray, battery mounting systems, engine compartment, vibration durability

INTRODUCTION

In modern automotive vehicles, the battery is one of the most important components of the electrical system and plays a critical role in vehicle operation. In conventional internal combustion engine vehicles, the battery is responsible for supplying the electrical energy required for engine starting, ignition systems, lighting systems, infotainment units, sensors, control modules, and various auxiliary electrical equipment (Bosch, 2018). As vehicle technologies continue to develop and the number of electrical and electronic systems increases, the importance of battery reliability and durability in automotive engineering has become more significant.

The battery is generally positioned in the engine compartment due to packaging efficiency and proximity to the starter and electrical distribution systems. However, in some vehicle architectures, batteries may also be located in the luggage compartment or under the passenger seat in order to improve weight distribution, thermal management, or packaging optimization (Larminie & Lowry, 2012). Regardless of its location, the battery must remain securely fixed throughout all vehicle operating conditions to ensure continuous electrical performance and operational safety.

Batteries mounted in the engine compartment are continuously exposed to harsh environmental and mechanical conditions during vehicle operation. These conditions include road-induced vibration, sudden acceleration and braking loads, cornering forces, thermal fluctuations caused by engine heat, humidity, and mechanical shocks resulting from uneven road surfaces (Linden & Reddy, 2002). Such environmental effects may negatively influence the structural integrity of the battery housing, electrical terminal connections, and the durability of surrounding mounting components.

For this reason, battery fixation systems are considered a critical engineering requirement in automotive vehicle design. Insufficient fixation of the battery may result in loosening of electrical connections, electrolyte leakage, excessive vibration-induced noise, damage to the battery casing, or even safety risks under severe operating conditions and crash events (Browne, 2017). In addition, uncontrolled battery movement may reduce the durability of the battery tray and fastening elements while negatively affecting service reliability and long-term vehicle performance.

To prevent these problems, automotive manufacturers employ different battery mounting strategies according to vehicle type, battery dimensions, engine compartment layout, vibration requirements, and serviceability expectations. Common fixation methods used in the automotive industry include bottom clamp systems, top clamp or crossbar fixation systems, frame-type retention systems, and strap-based fixation systems (Harty, 2015). Each mounting concept offers different advantages and disadvantages in terms of assembly efficiency, vibration resistance, packaging flexibility, manufacturing cost, and maintenance accessibility.

In recent years, increasing electrical loads, electrification trends, and the demand for improved vehicle durability have further increased the importance of robust battery fixation systems. Therefore, understanding the structural characteristics and engineering advantages of different battery mounting concepts is essential for improving vehicle safety, durability, production efficiency, and service performance. This study investigates commonly used battery fixation systems in automotive vehicles and evaluates their structural characteristics, advantages, and application strategies used in different vehicle platforms.

METHOD

In this study, battery fixation methods commonly used in the automotive industry were investigated through a comprehensive literature review and comparative vehicle architecture analysis. The study focused on evaluating different battery mounting concepts used in vehicle engine compartments in terms of structural configuration, vibration durability, assembly efficiency, and serviceability characteristics.

The research methodology was carried out in three main stages. In the first stage, battery mounting systems reported in automotive engineering literature and industrial applications were reviewed in detail. In the second stage, battery fixation designs used in engine compartments were classified according to their structural characteristics and fixation principles. In the final stage, battery mounting applications used in different vehicle platforms were comparatively analyzed in order to identify the advantages and limitations of each fixation concept under various vehicle design conditions.

Within the scope of the analysis, three different vehicle architectures belonging to different automotive manufacturers were examined. Due to confidentiality considerations, these vehicle platforms were anonymously identified as OEM 1, OEM 2, and OEM 3 throughout the study. The selected vehicle architectures were evaluated in terms of battery tray design, fixation strategy, packaging layout, and accessibility during assembly and service operations.

FINDINGS

Battery Fixation Systems

In automotive vehicles, secure attachment of the battery to the body is an important design criterion not only in terms of packaging and assembly, but also in terms of vibration durability, electrical continuity, serviceability, and vehicle safety. During vehicle operation, the battery may be exposed to road-induced vibrations, sudden acceleration and braking effects, temperature changes in the engine

compartment, and impact loads. Therefore, the battery fixation system must be designed to maintain the position of the battery throughout operating conditions [1], [2].

Battery fixation systems generally vary depending on the battery location within the vehicle, battery size, battery weight, vehicle architecture, service access requirements, and production line assembly strategy. The main battery fixation systems commonly used in the automotive industry can be classified as bottom clamp fixation systems, top clamp fixation systems, frame-type fixation systems, and strap-based fixation systems.

Bottom Clamp Fixation System

Figure 1 presents a bottom clamp battery fixation system commonly used in automotive engine compartments. In this mounting concept, the battery is fixed to the battery tray through a metal clamp positioned at the lower section of the battery and secured with a bolted connection. The system limits battery displacement in both horizontal and vertical directions, thereby improving vibration resistance and ensuring stable positioning during vehicle operation.



Figure 1. Bottom Clamp Fixation System Battery Assembly

The bottom clamp fixation system is widely utilized in passenger vehicles due to its simple structure and assembly advantages. Since the fixation mechanism is located at the lower part of the battery, no additional retaining component is required on the upper surface. This configuration increases packaging flexibility within the engine compartment and provides easier access during maintenance and battery replacement operations.

Another important advantage of the system is the low number of components required for assembly. Reduced part count contributes to shorter assembly times and improved production line efficiency in mass-production applications. In addition, the compact design of the fixation mechanism allows more effective utilization of available engine compartment space. Owing to these advantages, bottom clamp

systems are considered one of the preferred battery mounting solutions in modern passenger vehicle architectures (Bosch, 2018; Harty, 2015).

Advantages:

- Short assembly time.
- Low number of parts.
- Easy service access.
- It is widely used in passenger vehicles.
- Leaves packaging space in the upper region of the battery.
- Suitable for mass production conditions.

Top Clamp Fixation System

Figure 2 illustrates a top clamp battery fixation system used in automotive engine compartments. In this mounting configuration, the battery is secured by a metal bar, cross-member, or clamp positioned across the upper surface of the battery. The fixation element is typically connected to the battery tray or carrier bracket through bolted joints located at both ends. By applying pressure from the upper section, the system effectively restrains battery movement and maintains positional stability under dynamic operating conditions.



Figure 2. Top Clamp Fixation System Battery Assembly

Top clamp fixation systems are generally preferred in applications requiring higher mechanical retention force and improved vibration resistance. Due to the direct clamping force applied from the upper surface, these systems provide effective control against vertical battery displacement, especially in vehicles equipped with larger or heavier batteries. In addition, the robust structural configuration enhances durability under severe operating conditions such as road-induced vibration, sudden acceleration, braking loads, and impact forces.

Compared with bottom clamp systems, top clamp fixation systems may offer lower accessibility during maintenance operations because the upper retaining component must typically be removed before battery replacement or service procedures can be performed. Nevertheless, their superior fixation capability makes them suitable for commercial vehicles, heavy-duty applications, and vehicle platforms exposed to high dynamic loading conditions.

Another important advantage of top clamp systems is their ability to provide stable battery positioning even under harsh environmental and operating conditions. Therefore, these systems are widely used in applications where vibration durability and structural reliability are prioritized over packaging flexibility and assembly simplicity (Browne, 2017; Harty, 2015).

Advantages:

- Provides high fixation force.
- Suitable for heavy batteries.
- High impact and vibration durability.
- Effectively limits vertical movement of the battery.
- Provides reliable attachments under high dynamic load conditions.

Frame-Type Fixation System

Figure 3 illustrates a frame-type battery fixation system used in automotive engine compartments. In this fixation concept, the battery is surrounded and retained by a frame structure supporting the battery from all four sides. Unlike conventional fixation systems that restrict movement from only one direction, the frame-type configuration provides circumferential support, thereby improving positional control against both horizontal and vertical battery displacement.



Figure 3. Frame Type Fixation System Battery Assembly

Frame-type fixation systems are particularly advantageous in applications where high mechanical strength, positional accuracy, and vibration durability are critical to design requirements. By supporting

the battery through its side surfaces, the system effectively minimizes battery movement during cornering, sudden braking, impact loading, and road-induced vibration conditions. This enhanced structural stability contributes to improved durability of both the battery and surrounding mounting components.

Due to their robust structural configuration, frame-type systems are commonly preferred in vehicle architectures requiring high dynamic load resistance or precise control of the battery movement envelope. These systems can provide improved reliability under severe operating conditions and are suitable for applications where battery displacement must be minimized to protect electrical connections and surrounding components (Browne, 2017).

However, compared with bottom clamp fixation systems, frame-type configurations generally require a higher number of components and more complex assembly operations. In addition, the surrounding frame structure occupies additional packaging space within the engine compartment, which may create design constraints in compact vehicle architectures. Therefore, while frame-type systems offer superior fixation performance, packaging efficiency and assembly complexity must also be carefully considered during the vehicle design process.

Advantages:

- Provides high mechanical strength.
- Effective in terms of vibration control.
- Provides protection against lateral movements.
- Restricts the battery position in a more controlled way.
- Offers safe use under high dynamic conditions.

Strap-Based Fixation System

Figure 4 illustrates a strap-based battery fixation system used in automotive applications. In this mounting concept, the battery is secured to the battery tray by means of a durable strap, flexible band, or similar fastening element positioned over or around the battery. The fixation force is generated through the tension applied by the strap, which restricts battery movement during vehicle operation.



Figure 4. Strap-Based Fixation System Battery Assembly

Strap-based fixation systems are generally preferred in applications where low cost, lightweight construction, and rapid assembly are important priorities for design. Compared with conventional metallic fixation components, strap-based systems can provide a simpler and lighter solution while reducing overall component count. In addition, the flexible structure of the strap allows for easier installation and removal during maintenance or battery replacement operations.

One of the main advantages of this fixation concept is its manufacturing simplicity and reduced material cost. Due to the lightweight nature of flexible fastening elements, strap-based systems may also contribute to overall vehicle weight reduction targets. For this reason, they are commonly considered in lightweight vehicle architectures and cost-sensitive applications.

However, the structural performance and vibration durability of strap-based systems strongly depend on the material properties of the strap, the strength of the attachment points, and the ability of the system to maintain sufficient clamping force over time. Under severe vibration conditions, repeated dynamic loading may reduce fixation stability compared with rigid metallic mounting systems. Therefore, the use of strap-based fixation systems as a standalone solution may be limited in applications involving heavy batteries or high vibration exposure.

Due to these characteristics, strap-based battery fixation systems are generally utilized in special vehicle architectures, lightweight vehicle concepts, or applications where easy service accessibility and simplified assembly processes are prioritized.

Advantages:

- Low cost.
- Provides a lightweight design.
- Enable fast assembly.
- Easy to remove during service.
- Offers a practical solution for simple vehicle architecture.

CONCLUSION AND DISCUSSION

As a result of the examinations, it was determined that battery fixation systems vary depending on vehicle type, battery weight, engine compartment layout, and vibration requirements. In passenger vehicles, bottom clamp fixation systems are generally widely used because assembly ease, low part count, and service access are prioritized. In contrast, commercial vehicles or heavy-duty applications require higher mechanical strength; top clamps and frame-type systems become more advantageous.

Although strap-based systems provide advantages in terms of low cost and lightweight design, they may show more limited performance in terms of vibration durability compared with other systems. Therefore, the use of strap-based systems is generally limited to vehicle architectures with lower load levels or special packaging requirements.

Table 1. Comparison of Battery Fixation Systems

Fixation Type	Vibration Durability	Assembly Ease	Serviceability
Bottom clamp	High	Very good	Very good
Top clamp	Very high	Medium	Medium
Frame	Very high	Medium	Good
Strap	Medium	Very good	Very good

As shown in the table, bottom clamp systems stand out in terms of assembly and serviceability, while top clamp and frame-type systems provide higher vibration durability. This indicates that a single criterion is not sufficient in the selection of a battery fixation system. Battery weight, stiffness of the attachment points, engine compartment packaging space, production line access, and service operations should be evaluated together in the design decision.

Battery fixation systems used in the vehicle engine compartment are an important design element in terms of vehicle safety and continuity of electrical systems. The battery must remain in a fixed position throughout vehicle operating conditions to ensure the reliability of electrical connections and protection of the battery housing. Therefore, selecting the correct fixation method plays a critical role in terms of vibration durability, serviceability, production efficiency, and cost.

Among the fixation systems examined within the scope of this study, bottom clamp systems were found to provide advantages in passenger vehicle applications in terms of assembly ease and serviceability. Top clamp and frame-type systems stand out in applications requiring higher mechanical strength, while strap-based systems may be used in certain vehicle architectures due to their low cost and lightweight advantages. As a result, the selection of a battery fixation system should be evaluated holistically

according to the requirements of the vehicle platform, the physical characteristics of the battery, and the targeted durability performance.

REFERENCES

- Bosch. (2018). *Automotive handbook* (10th ed.). Wiley.
- Browne, M. (2017). Automotive battery mounting systems and vibration durability. *Journal of Automotive Engineering*.
- Harty, D. (2015). *Automotive engineering fundamentals*. SAE International.
- Khaligh, A., & Li, Z. (2010). Hybrid energy storage systems for electric vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 59(6), 2806–2814. <https://doi.org/10.1109/TVT.2010.2047736>
- Larminie, J., & Lowry, J. (2012). *Electric vehicle technology explained* (2nd ed.). Wiley.
- Linden, D., & Reddy, T. B. (2002). *Handbook of batteries* (3rd ed.). McGraw-Hill.
- WorldAutoSteel. (2021). *Tailored products – AHSS insights online database: Advanced high-strength steel application guidelines V6.0*. <https://ahssinsights.org/forming/tailored-products/tailored-products/>

Otomotiv Gövde İskeletinde Alüminyum Kullanımının Hafifletme, Birleştirme ve Sürdürülebilirlik Açısından İncelenmesi

Tahsin Batuhan YILMAZ

tahsin.batuhanyilmaz@tofas.com.tr; Üniversitesi, TOFAŞ Türk Otomobil Fabrikası A.Ş. Ar-Ge
Merkezi, Bursa / Türkiye.

Özet

Bu çalışma, otomotiv gövde iskeletinde (body-in-white, BIW) alüminyum kullanımını hafifletme, şekillendirme, birleştirme, çarpışma güvenliği ve sürdürülebilirlik boyutlarıyla incelemektedir. Araştırma, 2000–2025 döneminde yayımlanan temel bilimsel çalışmaların yapılandırılmış anlatsal derleme yaklaşımıyla değerlendirilmesine dayanmaktadır. İnceleme, alüminyumun düşük yoğunluğu, korozyon direnci ve geri dönüştürülebilirliği sayesinde BIW için güçlü bir aday olduğunu; ancak düşük elastik modül, geri yaylanma, farklı malzemelerle birleştirme güçlüğü ve hurda saflığı gereksinimi gibi sınırlılıklarının bulunduğunu göstermektedir. Bulgular, başarılı alüminyum BIW tasarımının yalnızca malzeme değişimiyle değil; kesit optimizasyonu, sıcak şekillendirme, hibrit birleştirme stratejileri ve kapalı döngü geri dönüşüm yaklaşımıyla mümkün olduğunu ortaya koymaktadır. Sonuç olarak alüminyum, doğru süreç yönetimiyle hafif ve sürdürülebilir gövde mimarileri için etkili bir çözüm sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: alüminyum alaşımları, BIW, birleştirme teknolojileri, hafifletme, sürdürülebilirlik

Abstract

This study examines the use of aluminum in automotive body-in-white (BIW) structures from the perspectives of lightweighting, forming, joining, crashworthiness, and sustainability. The research is based on a structured narrative review of key scientific studies published between 2000 and 2025. The review shows that aluminum is a strong candidate for BIW applications due to its low density, corrosion resistance, and recyclability; however, it also involves limitations such as low elastic modulus, springback, joining difficulties with dissimilar materials, and the need for high scrap purity. The findings indicate that successful aluminum BIW design cannot be achieved through material substitution alone; it also requires cross-section optimization, hot forming, hybrid joining strategies, and closed-loop recycling approaches. As a result, aluminum offers an effective solution for lightweight and sustainable body architectures when supported by appropriate process management

Keywords: aluminum alloys, BIW, joining technologies, lightweighting, sustainability

GİRİŞ

Otomotiv gövde iskeleti, diğer adıyla body-in-white (BIW), aracın yük taşıyan ana kabuğunu oluşturduğu için hafifletme çalışmalarının en kritik uygulama alanlarından biridir. Araç gövdesi üzerinde yapılacak her iyileştirme, taşıtın kütlesi, yapısal rijitliği, çarpışma güvenliği, titreşim-gürültü

davranışı ve kullanım sırasındaki enerji gereksinimi üzerinde doğrudan etkili olmaktadır. Bu nedenle son yirmi beş yılda otomotiv hafifletme literatürü, özellikle çelik dışı yapısal malzemeler ve bunların üretim süreçleri üzerinde yoğunlaşmıştır (Das, 2000; Taub ve ark., 2019; Candela ve ark., 2024).

Alüminyum, yaklaşık olarak çeliğe kıyasla çok daha düşük yoğunluk göstermesi, korozyon direnci sunması ve yüksek geri dönüştürülebilirliği sayesinde araç gövdesi için öne çıkan malzemelerden biridir. Buna karşılık düşük elastik modül, eşdeğer rijitlik için kesit geometrisinin dikkatle tasarlanmasını zorunlu kılmakta; oda sıcaklığındaki sınırlı şekillendirilebilirlik ve geri yaylanma ise üretim doğruluğunu zorlaştırmaktadır. Ayrıca alüminyumun çelik ve diğer malzemelerle birlikte kullanıldığı yapılarda intermetalik faz oluşumu, galvanik korozyon ve süreç uyumu gibi birleştirme kaynaklı problemler ortaya çıkmaktadır (Miller ve ark., 2000; Hirsch, 2014; Tisza ve Czinege, 2018; Gullino, Matteis ve D’Aiuto, 2019).

Literatürde malzeme geliştirme, sıcak şekillendirme, yapısal yapıştırma, perçinleme ve yaşam döngüsü analizine ilişkin çok sayıda çalışma bulunmasına karşın, bu başlıkların araç gövdesi bağlamında birlikte ele alındığı bütüncül değerlendirmeler sınırlıdır. Bu çalışmanın amacı; alüminyum araç gövdesi kullanımını malzeme seçimi, şekillendirme kabiliyeti, birleştirme teknolojileri, çarpışma performansı ve sürdürülebilirlik açılarından bütüncül biçimde incelemek ve literatürden hareketle uygulanabilir tasarım-pratik sonuçlar ortaya koymaktır (Zhang ve Xu, 2022; Wu ve ark., 2025).

YÖNTEM

Bu araştırma, nitel araştırma yaklaşımı içinde yapılandırılmış anlatsal derleme olarak tasarlanmıştır. İnceleme kapsamı, 2000–2025 yılları arasında yayımlanan ve otomotiv gövdesi yapılarında alüminyum kullanımını doğrudan ele alan hakemli makaleler ile teknik bildirilerle sınırlandırılmıştır. Çalışmada yalnızca malzeme özelliklerini değil, araç gövdesi ölçeğinde tasarım ve üretim kararlarını etkileyen yayınlara öncelik verilmiştir.

Kaynak taramasında “aluminum body-in-white”, “automotive lightweighting”, “aluminum joining”, “self-piercing riveting”, “adhesive bonding”, “hot stamping” ve “life cycle assessment” anahtar sözcükleri kullanılmış; açık erişimli bilimsel yayın platformlarında erişilebilen çalışmalar değerlendirilmiştir. Sadece güç aktarma organlarına, jantlara ya da araç gövdesi dışı alt sistemlere odaklanan yayınlar kapsam dışında bırakılmış; buna karşılık gövde levhaları, taşıyıcı profiller, düğüm bölgeleri, bağlantı detayları ve geri dönüşüm konularını ele alan çalışmalar incelemeye dâhil edilmiştir.

Başlangıç taramasından sonra konu ile doğrudan ilişkili temel yayınlar ayrıntılı incelemeye alınmış ve veriler dört tematik başlık altında çözümlenmiştir: malzeme ve kesit tasarımı, şekillendirme davranışı, birleştirme teknolojileri ile yaşam döngüsü ve sürdürülebilirlik. Bulgular yorumlanırken marka ya da model odaklı örnekler yerine, farklı çalışmalarda ortak biçimde tekrar eden mühendislik eğilimleri esas alınmıştır.

BULGULAR

İncelenen çalışmalar, alüminyum araç gövdesi uygulamalarında özellikle 5xxx ve 6xxx serisi alaşımların belirgin biçimde öne çıktığını göstermektedir. 5xxx serileri yüksek korozyon direnci ve yeterli dayanım nedeniyle yapısal parçalarda, 6xxx serileri ise şekillendirilebilirlik ve boya fırını sertleşmesi avantajı nedeniyle gövde panellerinde yaygın biçimde değerlendirilmektedir (Miller ve ark., 2000; Hirsch, 2014). İkameizasyondaki alüminyumun düşük elastik modülü, yalnızca “çeliği bire bir ikame” eden çözümlerin yetersiz kalmasına neden olmakta; başarılı araç gövdesi uygulamalarında kesit optimizasyonu, yük yolu sürekliliği ve yerel rijitlik artırıcı geometriler ön plana çıkmaktadır (Tisza ve Czinege, 2018; Taub ve ark., 2019).

Bununla birlikte otomotiv sektöründe alüminyum kullanımının gelişimi yalnızca alaşım bazında değil, araç başına kullanılan toplam alüminyum miktarı açısından da önemli değişim göstermiştir. Özellikle 1980 sonrası dönemde emisyon regülasyonları, çarpışma güvenliği gereksinimleri ve elektrikli araç dönüşümü doğrultusunda araç gövdesi yapılarında alüminyum kullanım oranı belirgin biçimde artmıştır.

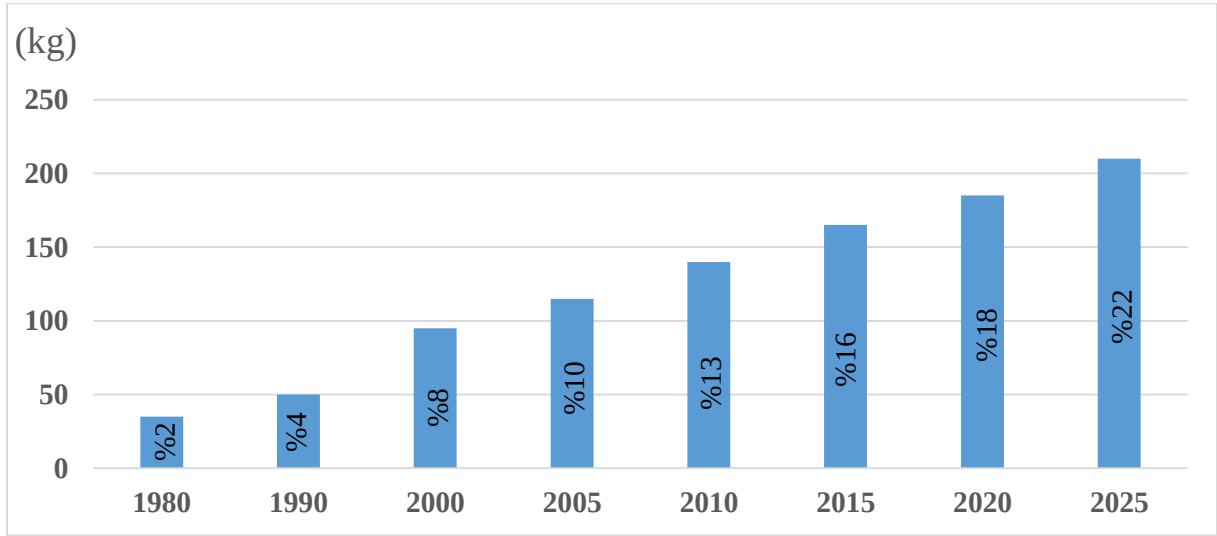
Tablo 1 incelendiğinde, otomotiv sektöründe araç başına kullanılan alüminyum miktarının 1980’lerden günümüze kadar sürekli artış gösterdiği görülmektedir. Özellikle 2000 sonrası dönemde emisyon regülasyonları, hafifletme hedefleri ve elektrikli araç teknolojilerinin yaygınlaşmasıyla birlikte araç gövdesi yapılarındaki alüminyum kullanım oranı belirgin biçimde yükselmiştir. Bu eğilim, alüminyumun yalnızca yardımcı bir mühendislik malzemesi olmaktan çıkarak modern gövde mimarilerinin temel yapısal bileşenlerinden biri hâline geldiğini göstermektedir. Tablo 1’de verilen veriler European Aluminium (2019), EPA Automotive Trends Report (2025) ve Taub ve ark. (2019) çalışmalarından derlenmiştir.

Tablo 1. Avrupa Binek Araçlarında Ortalama Alüminyum Kullanımı Eğilimi

Yıl	Araç Başına Ortalama Alüminyum (kg)	Araç Gövdesi İçindeki Alüminyum Oranı (%)
1980	35	2
1990	50	4
2000	95	8
2005	115	10
2010	140	13
2015	165	16
2020	185	18
2025	210	22

Şekil 2 incelendiğinde araç başına kullanılan alüminyum miktarının özellikle 2000 sonrası dönemde önemli ölçüde arttığı görülmektedir. Buna karşın güvenlik sistemleri, batarya teknolojileri ve konfor ekipmanlarındaki artış nedeniyle toplam araç kütlesi aynı oranda azalmamıştır. Bu durum araç gövdesi hafifletme çalışmalarında yalnızca malzeme değişiminin değil, kesit optimizasyonu ve sistem seviyesinde mühendislik yaklaşımının gerekli olduğunu göstermektedir. Şekil 2’de verilen eğilimler European Aluminium (2019), EPA Automotive Trends Report (2025) ve Taub ve ark. (2019) çalışmalarından derlenmiştir.

Şekillendirme açısından en kritik sorunlar geri yaylanma, yüzey kalitesi ve oda sıcaklığında sınırlı form alma kabiliyetidir. Wang ve ark. (2017), AA5754 üzerinde gerçekleştirdikleri çalışmada yükselen şekillendirme sıcaklığının geri yaylanmayı azalttığını; özellikle sıcak kalıp kullanımının daha belirgin sonuç verdiğini göstermiştir. Benzer şekilde Wu ve ark. (2025), sıcak şekillendirme ve su verme temelli süreçlerin, alüminyum levhalarda düşük boyutsal doğruluk ve yüksek geri yaylanma sorunlarını azaltmada önemli bir araştırma hattı oluşturduğunu vurgulamaktadır. Bu bulgu, karmaşık araç gövde parçalarında proses tasarımının malzeme seçimi kadar belirleyici olduğunu göstermektedir.



Şekil 2. 1980–2025 Döneminde Araç Başına Alüminyum Kullanımı ve Araç Gövdesi İçindeki Alüminyum Oranı

Birleştirme teknolojileri literatürde en yoğun tartışılan alanlardan biridir. Li ve ark. (2017), kendinden delici perçinlemenin alüminyum ve çok malzemeli hafif yapıların başlıca birleştirme yöntemi hâline geldiğini; ön delik gerektirmemesi ve yüksek statik-yorulma dayanımı sağlaması nedeniyle üretim açısından önemli üstünlük sunduğunu belirtmektedir. Buna karşılık alüminyum-çelik birleşimlerinde süreç uyumu daha güçtür; Gullino ve ark. (2019), bu tür birleşimlerde intermetalik tabaka oluşumu ve farklı termofiziksel özelliklerin temel zorluklar olduğunu göstermektedir. Yapısal yapıştırma ise gerilme dağılımını homojenleştirerek rijitlik, yorulma davranışı, NVH performansı ve çarpışma dayanımına olumlu katkı sağlamakta; ayrıca farklı metaller arasında elektriksel ayırıcı rol üstlenerek galvanik korozyon riskini azaltabilmektedir (Cavezza ve ark., 2020).

Çarpışma güvenliği ve sürdürülebilirlik bulguları birlikte değerlendirildiğinde, alüminyumun başarısının yalnızca kütle azaltımına bağlı olmadığı görülmektedir. Wheeler (1998), uygun şekilde tasarlanmış alüminyum yapı taşıtlarda çarpışma güvenliği hedeflerinin eşdeğer koruma düzeyiyle karşılanabildiğini göstermektedir. Diğer taraftan Abdullah ve ark. (2020), çarpışma kutularının enerji sönümleme kapasitesinin malzeme, geometri ve çökme modundan birlikte etkilendiğini vurgulamaktadır. Yaşam döngüsü açısından Das (2000), alüminyum araç gövdesi değerlendirmesinin üretim, kullanım ve geri dönüşüm evrelerinin tamamı üzerinden yapılması gerektiğini belirtmiştir. Zhu ve ark. (2021) ise kapalı döngü geri dönüşümün hurda akışının kimyasal homojenliğine bağlı olduğunu, demir ve bakır gibi kirleticilerin geri dönüştürülmüş levha kalitesini düşürebildiğini göstermektedir.

Son yıllardaki çalışmalar, çevresel kazanımların geleneksel “daha hafif daha iyidir” yaklaşımıyla tek başına açıklanamayacağını ortaya koymaktadır. Candela ve ark. (2024), hafifletmenin enerji tüketimi üzerindeki etkisinin kullanım koşullarıyla birlikte değerlendirilmesi gerektiğini; Dachev ve ark. (2025) ise yapısal yapıştırma gibi yöntemlerin kullanım fazında avantaj sağlamasına karşın sökülebilirlik ve geri dönüşüm açısından yeni tasarım ihtiyaçları doğurduğunu vurgulamaktadır. Buna göre alüminyum araç gövdesi için en uygun yaklaşım; malzeme, proses, bağlantı, kullanım ömrü ve yaşam sonu senaryolarını aynı tasarım çerçevesinde birleştiren sistem düzeyinde mühendislik yaklaşımıdır.

SONUÇ VE TARTIŞMA

Bu çalışma, alüminyumun otomotiv araç gövde uygulamalarında güçlü bir hafifletme seçeneği olduğunu; ancak başarısının ancak sistem düzeyinde tasarım yaklaşımıyla mümkün olduğunu göstermektedir. Diğer bir ifadeyle alüminyum, yalnızca çeliğin daha hafif bir eşdeğeri olarak değil; farklı kesit biçimleri, farklı bağlantı mantıkları ve farklı şekillendirme pencereleri gerektiren ayrı bir mühendislik çözümü olarak ele alınmalıdır.

Tartışma bulguları, eşdeğer rijitlik ve çarpışma performansının malzeme seçimi kadar kesit geometrisine, proses parametrelerine ve birleşim tasarımına bağlı olduğunu ortaya koymaktadır. Bu nedenle alüminyum araç gövde stratejisinde en rasyonel yaklaşım, tam ikame yerine fonksiyona göre yerel malzeme kullanımı, sıcak şekillendirme ile boyutsal kararlılığın artırılması ve mekanik birleştirme ile yapıştırmanın birlikte ele alındığı hibrit çözümlerin geliştirilmesidir. Ayrıca çevresel performansın yalnızca kullanım evresiyle değil, geri dönüşüm kalitesi ve sökülebilirlik düzeyiyle ilişkilendirilmesi gerekmektedir.

Sonuç olarak, gelecekte yapılacak çalışmalarda araç gövde alt sistemlerinin düğüm ve yük yolu temelli optimizasyonuna, sıcak şekillendirme sonrası özellik değişimlerinin sayısal modellerle daha güçlü biçimde eşleştirilmesine ve kapalı döngü geri dönüşümü destekleyen sökülebilir birleştirme çözümlerine odaklanılması önerilmektedir. Böyle bir yaklaşım, alüminyumun hafif, güvenli, üretilebilir ve sürdürülebilir gövde sistemleri içindeki potansiyelini daha görünür hâle getirecektir.

KAYNAKÇA

Abdullah, N. A. Z., Sani, M. S. M., Salwani, M. S., & Husain, N. A. (2020). A review on crashworthiness studies of crash box structure. *Thin-Walled Structures*, 153, 106795.
<https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.106795>

- Candela, A., Sandrini, G., Gadola, M., Chindamo, D., & Magri, P. (2024). Lightweighting in the automotive industry as a measure for energy efficiency: Review of the main materials and methods. *Heliyon*, 10(8), e29728. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e29728>
- Cavezza, F., Boehm, M., Terryn, H., & Hauffman, T. (2020). A review on adhesively bonded aluminium joints in the automotive industry. *Metals*, 10(6), 730. <https://doi.org/10.3390/met10060730>
- Das, S. (2000). The life-cycle impacts of aluminum body-in-white automotive material. *JOM*, 52(8), 41–44. <https://doi.org/10.1007/s11837-000-0173-2>
- Dachev, D., Kazilas, M., Alfano, G., & Omairey, S. (2025). Towards reliable adhesive bonding: A comprehensive review of mechanisms, defects, and design considerations. *Materials*, 18(12), 2724. <https://doi.org/10.3390/ma18122724>
- Gullino, A., Matteis, P., & D'Aiuto, F. (2019). Review of aluminum-to-steel welding technologies for car-body applications. *Metals*, 9(3), 315. <https://doi.org/10.3390/met9030315>
- Hirsch, J. (2014). Recent development in aluminium for automotive applications. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 24(7), 1995–2002. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(14\)63305-7](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(14)63305-7)
- Li, D., Chrysanthou, A., Patel, I., & Williams, G. (2017). Self-piercing riveting-a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 92, 1777–1824. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0156-x>
- Miller, W. S., Zhuang, L., Bottema, J., Wittebrood, A. J., De Smet, P., Haszler, A., & Vieregge, A. (2000). Recent development in aluminium alloys for the automotive industry. *Materials Science and Engineering: A*, 280(1), 37–49. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(99\)00653-X](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(99)00653-X)
- Taub, A., De Moor, E., Luo, A. A., Matlock, D. K., Speer, J. G., & Vaidya, U. (2019). Materials for automotive lightweighting. *Annual Review of Materials Research*, 49, 327–359. <https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-070218-010134>
- Tisza, M., & Czinege, I. (2018). Comparative study of the application of steels and aluminium in lightweight production of automotive parts. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 1(4), 229–238. <https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2018.09.001>
- Wang, A., Zhong, K., El Fakir, O., Liu, J., Sun, C., Wang, L., Lin, J., & Dean, T. A. (2017). Springback analysis of AA5754 after hot stamping: Experiments and FE modelling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 89(5-8), 1339–1352. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9166-3>
- Wheeler, M. J. (1998). Crashworthiness of aluminum-structured vehicles. *SAE Technical Paper 986018*. <https://doi.org/10.4271/986018>
- Wu, R., Dai, W., Luo, J., Li, M., Liu, Y., & Li, H. (2025). Aluminum alloy hot stamping and forming technology: A review. *Materials*, 18(8), 1694. <https://doi.org/10.3390/ma18081694>
- Zhang, W., & Xu, J. (2022). Advanced lightweight materials for automobiles: A review. *Materials & Design*, 221, 110994. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110994>
- Zhu, Y., Chappuis, L. B., De Kleine, R., Kim, H. C., Wallington, T. J., Luckey, G., & Cooper, D. R. (2021). The coming wave of aluminum sheet scrap from vehicle recycling in the United States. *Resources, Conservation and Recycling*, 164, 105208. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105208>

Otomotiv Sac Parçalarında Geometrik Tasarımın Çarpışma Performansına Etkisinin İncelenmesi

Atahan GEN¹, Beyzanur ERDEM²

¹atahan.gen@tofas.com.tr Tofas Türk Otomobil Fabrikası Ar-Ge Merkezi Bursa, Türkiye.

²beyzanur.erdem@tofas.com.tr; Tofas Türk Otomobil Fabrikası Ar-Ge Merkezi, Bursa, Türkiye.

Özet

Otomotiv sektöründe araç güvenliği, çarpışma anında kinetik enerjinin kontrollü ve öngörülebilir bir şekilde sönmelenmesine doğrudan bağlıdır. Bu çalışmada, sac metal parçalarda kullanılan geometrik tasarım parametrelerinin çarpışma performansı üzerindeki etkileri detaylı olarak incelenmiştir. Özellikle kesit geometrisi, kalınlık dağılımı, takviye elemanlarının kullanımı ve form geçişleri gibi kritik parametrelerin deformasyon karakteristiği ve enerji soğurma kapasitesi üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Farklı geometri alternatifleri oluşturularak karşılaştırmalar gerçekleştirilmiş ve bu yapıların çarpışma davranışları gözlemlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, kutu kesitli ve takviyeli yapıların daha stabil ve kontrollü deformasyon sergilediğini, buna bağlı olarak daha yüksek enerji absorpsiyonu sağladığını ortaya koymaktadır. Ayrıca, düzensiz deformasyonun önlenmesinde geometrik sürekliliğin önemli bir rol oynadığı belirlenmiştir. Bu çalışma, otomotiv sac parça tasarımında geometri optimizasyonunun araç güvenliği ve yolcu koruması açısından kritik bir tasarım girdisi olduğunu vurgulamaktadır.

Anahtar Kelimeler: enerji sönmelenmesi, sac metal, burkulma, CAE, otomotiv güvenliği, çarpışma dayanımı

Abstract

In the automotive industry, vehicle safety is directly dependent on the controlled and predictable absorption of kinetic energy during a collision. In this study, the effects of geometric design parameters used in sheet metal components on crash performance were examined in detail. In particular, the effects of critical parameters such as cross-sectional geometry, thickness distribution, the use of reinforcement elements, and form transitions on deformation characteristics and energy absorption capacity were evaluated. Comparisons were made by creating different geometric alternatives, and the crash behaviors of these structures were observed. The results indicate that box-sectioned and reinforced structures exhibit more stable and controlled deformation, thereby providing higher energy absorption. Additionally, it was determined that geometric continuity plays a significant role in preventing irregular deformation. This study emphasizes that geometric optimization in automotive sheet metal part design is a critical design input for vehicle safety and occupant protection.

Keywords: energy absorption, sheet metal, buckling, CAE, automotive safety, crashworthiness

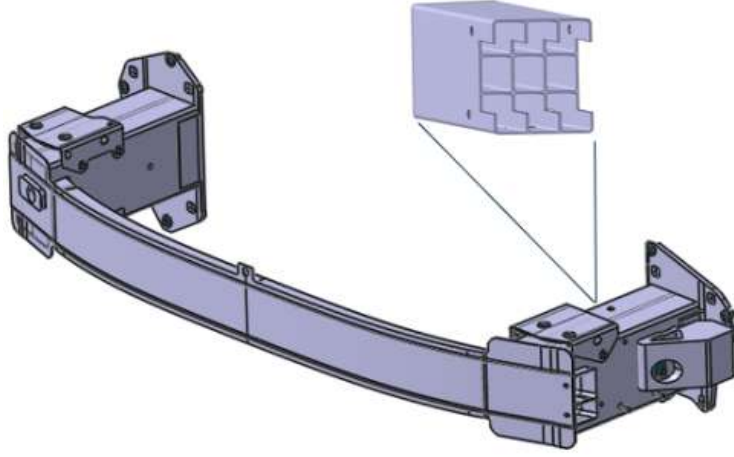
GİRİŞ

Günümüzde en çok kullanılan ulaşım aracı olan otomobillerin kaza anındaki çarpışma performansı büyük bir önem taşımaktadır ve bu yüzden güvenlik, otomotiv sektöründe tasarım sürecindeki en kritik konulardan bir tanesidir. Güvenliği aktif ve pasif olmak üzere ikiye ayırabiliriz: Aktif güvenlik sistemleri kazayı önlemeye çalışır. Pasif güvenlik sistemleri ise kaza gerçekleşikten sonra yolcuları korumaya çalışır. Çarpışma anında araçların yolcu kabinini koruyabilmesi için alınan darbe enerjisinin kontrollü bir şekilde sönümlemesi gerekmektedir. Bu sebeple sac metal parçalar, özellikle ön ve arka çarpışma bölgelerinde enerji sönümleyen temel yapısal elemanlar (crash box, cross car beam gibi ince cidarlı sac metal yapılar) olarak görev almaktadır. Sac parçalardan yani çarpışma kutuları (Şekil 1) gibi parçalardan beklenen özellikler arasında geri dönüştürülebilirlik, maksimum sönümleme performansı, minimum ağırlık, minimum üretim süresi ve üretim maliyeti sayılabilir (Ateş, Bakırcı, Günaydın, Ensarioğlu & Çakır, 2022, s. 832). Çarpışma sönümleyiciler çok farklı tasarımlar ile üretilmektedir. Bu farklı tasarımlar çarpışma sönümleyicilerin kullanıldığı araçlar için özel dizayn edilmektedir. Her bir aracın farklı fiziki özellikleri ve hız limiti vardır. Araçların bu özelliklerine göre şekil alan bu sönümleyiciler, kaza anında oluşabilecek darbelerin minimum seviyelere indirilmesi görevini üstlenmektedirler (Yakupoglu, 2021, s. 14). Araç çarpma anında kinetik enerjinin büyük çoğunluğu deformasyon ile sönümlemektedir. Bu sebeple yapısal parçaların kontrollü deformasyon göstermesi araç bütünlüğü ve yolcuların güvenliği açısından önemlidir. İnce cidarlı sac metal parçaların ağırlık olarak düşük, enerji absorpsiyonu olarak ise yüksek karakterde olması otomotiv endüstrisinde yaygın olarak tercih edilmesini sağlamaktadır.

Çalışmada crashworthiness performansını etkileyen parametreler incelenmiştir. Özellikle sac kalınlığı, kesit geometrisi, çok hücreli yapı kullanımı, bead/rib geometrileri ve katlama bölgeleri ele alınmıştır. Dairesel, kare ve çok hücreli kesit geometrilerinin eksenel çarpışma davranışları farklılık göstermektedir. Çok hücreli yapıların daha kararlı katlanma modu gösterdiği ve enerji absorpsiyonunu artırdığı görülmüştür. Bu konuda sonlu elemanlar analizi yapılırken LS-DYNA ve Abaqus gibi programlar önemli araçlar haline gelmiştir.

Bununla birlikte otomotiv sac parçalarında geometrik tasarım parametrelerinin çarpışma performansına etkisinde özellikle düşük ağırlık ve yüksek enerji absorpsiyonu hedeflerinin aynı anda sağlanabilmesi için optimum geometrik yapıların belirlenmesi gerekmektedir.

Bu çalışmanın amacı, otomotiv sac parçalarında geometrik tasarım parametrelerinin çarpışma performansı üzerindeki etkilerini incelemektir. Bu kapsamda farklı kesit geometrileri, sac kalınlıkları, rib geometrileri ve çok hücreli yapı tasarımları değerlendirilmiştir. Çalışma sonucunda elde edilen bulguların hafif araç tasarımı ile çarpışma güvenliği arasındaki optimum dengenin oluşturulmasına katkı sağlaması hedeflenmektedir.



Şekil 1. Ön tampon sistemi ve çarpışma kutusu yapısının şematik gösterimi (Goez&Rexhepi, 2018)

YÖNTEM

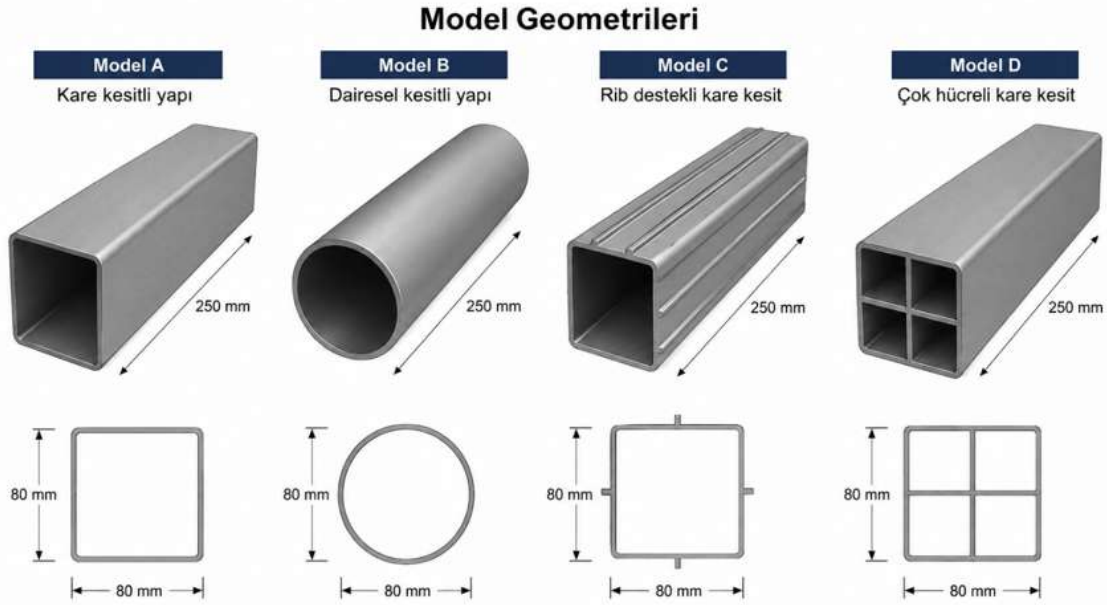
Bu çalışma kapsamında otomotiv sektöründe çarpışma enerjisini sönmölemek için kullanılan ince cidarlı sac metal parçaların geometrik tasarım parametreleri incelenmiştir. Farklı kesit geometrilerine sahip metal parça modelleri oluşturularak eksenel çarpışma koşulları altında davranışları birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Geometrik değişimlerin deformasyon modları, enerji absorpsiyon kapasiteleri ve maksimum çarpışma kuvveti üzerindeki etkileri sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak değerlendirilmiştir.

Çalışma sürecinde dairesel kesitli, kare kesitli, çok hücreli ve rib destekli olmak üzere dört farklı model geometrisi ele alınmıştır. Bütün bu modeller benzer kesit ölçülerine ve aynı uzunluğa sahip olacak şekilde modellenmiş ve böylece geometrik tasarımın çarpışma performansı üzerine olan etkisini doğrudan karşılaştırabileceğimiz bir hale gelmiştir. Modellerin eksenel yükleme koşulu altındaki katlanma davranışları ve enerji sönmöleme karakteristikleri incelenmiştir. Analizde kullanılan sınır şartları, malzeme modeli ve geometriler alt başlıklarda aktarılmıştır.

Model Geometrileri: Dört farklı geometrik model temsili olarak gösterilmiş (Şekil 2) ve değerlendirilmiştir;

- 1- Model A: Kare kesitli yapı
- 2- Model B: Dairesel kesitli yapı
- 3- Model C: Rib destekli yapı
- 4- Model D: Çok hücreli kare kesit

Tüm modellerin uzunluğu 250mm ve kesit boyutları ise 80mm x 80mm olarak seçilmiştir.



Şekil 2. Araştırma kapsamında oluşturulan farklı kesit geometrilerine sahip ince cidarlı temsili yapılar

Malzeme Özellikleri: Çalışmada otomotiv sektöründe yaygın olarak kullanılan yüksek dayanımlı düşük alaşımlı çelik malzeme (Tablo 1) kullanılmıştır.

Tablo 1. Malzeme Özellikleri

Özellik	Değer
Yoğunluk	7850 kg/m ³
Elastisite Modülü	210 GPa
Poisson Oranı	0.3
Akma Dayanımı	350 MPa
Çekme Dayanımı	450 MPa

Malzeme davranışı elastoplastik olarak tanımlanmıştır.

Sonlu Elemanlar Modeli: Çalışmada sonlu elemanlar analizinde ince cidarlı yapıların davranışını modellemek için kullanılan kabuk (Shell) eleman tipi tercih edilmiştir. Özellikle sac metal parçalar, otomotiv gövde elemanları, crash box, torpido traversi, şasi parçalarında tercih edilir. Shell elementler; çekme, basma, burkulma ve özellikle sac parçaların en önemli davranışı olan eğilmeyi aynı anda birlikte çözer. Kalınlığın çok küçük, yüzey boyutlarının büyük olduğu yapılara uygundur. Özetle; çok hızlı çözüm, düşük işlem maliyeti, ince saclara uygunluk, iyi bükülme davranışı, çarpışma analizinde yüksek verim ve temas çözümlerinde avantaj gibi faydalarda dolayı bu yöntem seçilmektedir.

Çarpışma Koşulları: Tüm modeller rijit duvara eksenel doğrultuda ve 55 km/h olarak belirlenmiştir. Alt uç sabitlemiş ve üst bölgeye hız tanımlanmıştır.

Çarpışma performansının değerlendirilmesinde aşağıdaki kriterlere dikkat edilmiştir: Enerji absorpsiyonu (EA), spesifik enerji absorpsiyonu (SEA), maksimum çarpışma kuvveti, deformasyon modu, ezilme mesafesi.

Enerji absorpsiyonu için

$$EA = \int F(x) dx$$

Spesifik enerji absorpsiyonu için

$$SEA = \frac{EA}{m}$$

Formülleri kullanılmıştır.

BULGULAR

Yapılan analizin sonuçlarına göre geometrik tasarım parametrelerinin deformasyon modu üzerinde önemli etkileri olduğu görülmüştür.

Deformasyon Davranışları: Kare kesitli yapı kontrollü progresif katlanma davranışı sergilemiştir. Dairesel kesitli modelde ise lokal burkulmaların daha erken olduğu gözlemlenmiştir. Rib destekli modelde katlanma bölgelerinin daha kontrollü olduğu belirlenmiştir. Çok hücreli yapının ise en kararlı deformasyon davranışı gösterdiği görülmüştür. Çok hücreli kesitlerde iç hücrelerin ek rijitlik sağlaması sayesinde deformasyonun daha homojen dağıldığı görülmüştür.

Kuvvet-Deplasman Davranışı: Çarpışma sırasında elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri incelendiğinde tüm modellerde başlangıçta yüksek pik kuvvet olduğu gözlemlenmiştir. Ancak çok hücreli modelde kuvvet dalgalanmalarının daha düşük olduğu ve daha stabil enerji absorpsiyonu gerçekleştiği görülmüştür. Rib destekli modelde ilk pik kuvvetinin arttığı ancak katlanma davranışının daha kontrollü hale geldiği belirlenmiştir. Tüm bu davranışları göz önünde bulundurarak elde edilen sonuçlar (Tablo 2) aşağıdaki gibidir:

Tablo 2. Crash Performans – Enerji Absorpsiyonu Sonuçları

	EA(kJ)	Peak Force (kN)	SEA(kJ/kg)
Kare Kesit	12.4	82	18.6
Dairesel Kesit	10.1	95	15.2
Rib Destekli	14.2	90	20.1
Çok Hücreli	15.8	88	21.4

Elde edilen sonuçlara göre en yüksek enerji absorpsiyonu çok hücreli yapıda elde edilmiştir. Dairesel kesitli modelin ise en düşük enerji absorpsiyonu performansına sahip olduğu gözlemlenmiştir.

Çok hücreli yapının yüksek SEA değeri, hafif araç tasarımı açısından önemli avantaj sağlamaktadır.

Geometrik Parametrelerin Etkileri

Kesit Geometrisi: Kesit geometrisinin deformasyon davranışı üzerinde doğrudan bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Kare kesitli yapıların daha stabil bir katlanma davranışı sergilediği belirlenmiştir.

Rib Geometrileri: Rib geometrilerinin bölgesel rijitliği artırarak kontrollü katlanmayı iyileştirdiği belirlenmiştir. Ek olarak, enerji sönümleme kapasitesinin de arttığı görülmüştür.

Çok Hücreli Yapılar: Çok hücreli yapılar yük dağılımını iyileştirerek daha kararlı bir deformasyon sağlamıştır. Bu durum da enerji absorpsiyonu performansına olumlu yönde katkı sağlamıştır.

Sac Kalınlığı: Sac kalınlığının artırılması enerji absorpsiyonunu yükseltmesine rağmen maksimum çarpışma kuvvetini de artırmıştır. Bu sebeple optimum kalınlık seçimi çok önemlidir.

SONUÇ VE TARTIŞMA

Bu çalışmada otomotiv sac parçalarında geometrik tasarım parametrelerinin çarpışma performansı üzerindeki etkileri ele alınmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir;

1. Kesit geometrisi çarpışma performansı üzerinde önemli etkiye sahiptir.
2. Kesit geometrisi üzerindeki kenar sayısının artmasıyla birlikte yükün darbe esnasında taşınımı daha homojen olmuştur. Bu nedenle bu tarz çarpışma kutularının tasarımında kenar sayısı çok olan kesit tiplerinin belirlenmesi uygun çözüm olacaktır (Doğan & Kamer, 2024, s. 726).
3. Çok hücreli yapıların enerji absorpsiyonu açısından daha başarılı sonuç verdiği belirlenmiştir.
4. Rib geometrileri kontrollü katlanmayı iyileştirmiştir.
5. Kare kesitli yapıların daha stabil deformasyon modu sergilediği görülmüştür.
6. Sac kalınlığının artırılması enerji absorpsiyonunu artırmaya rağmen pik kuvvetleri yükseltmiştir.
7. Geometrik optimizasyonun hafiflik ve güvenlik hedeflerinin birlikte sağlanmasında kritik öneme sahip olduğu belirlenmiştir.

Çalışmanın sonucunda, otomotiv sac parçalarında geometrik tasarımın çarpışma performansı yönünde belirleyici bir rol oynadığını görülmektedir. Özellikle çok hücreli yapılar ve rib destekli geometriler enerji sönümleme açısından önemli avantajlar sağlamaktadır. Çarpışma kutularında sönümlenen enerji miktarının artırılması amacıyla tek hücreli yapılar yerine çok hücreli yapılar tercih edilmektedir (Doğan & Kamer, 2024, s. 720).

Bunlarla birlikte yüksek rijitlik bazı durumlarda maksimum çarpışma kuvvetlerini artırabilmektedir. Bu sebeple sadece enerji absorpsiyonu değil, yolcuların güvenliği yönünden pik kuvvet seviyeleri de göz önünde bulundurulmalıdır.

Yapılacak olan gelecek çalışmalarda: optimizasyon algoritmaları, farklı malzeme kombinasyonları ve hibrit-metal kompozit yapılar incelenebilir. Ek olarak, gerçek araç çarpışma testleri ve sonlu eleman analizlerinin korelasyonu değerlendirilerek daha güvenli tasarım metodolojileri geliştirilebilir.

KAYNAKÇA

Doğan, O., & Kamer, M. S. (2024). Farklı kesit geometrilerine sahip ince duvarlı sac metal çarpışma kutularının darbe performanslarının nümerik incelenmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 39(3).

Ateş, F., Bakırcı, A., Günaydın, A. C., Ensarioğlu, C., & Çakır, M. C. (2022). Otomobil çarpışma kutularında performans artırıcı yaklaşımların incelenmesi. *BAUN Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 24(2), 830–856.

Goez, J., & Rexhepi, M. (2018). *Modeling of front bumper system with emphasis on lightweight and low cost: A product development project at Volvo Cars* (Master's thesis, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden).

Yakupoglu, C. (2021). *Otomotivlerde kullanılan crash boxların CMT yöntemi ile birleştirilebilirliğinin ve mekanik özelliklerinin incelenmesi* (Yüksek lisans tezi, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Sakarya, Türkiye).

Mikromobilite Araçlarının Arka Süspansiyonu İçin Salıncak Kolu Konsept Tasarım Çalışması

Onur ONARLAR¹, Zafer GÜLER², İbrahim İNAN³, Murat AKDOĞAN⁴

¹onur.onarlar@tofas.com.tr; Tofaş Türk Otomobil Fabrikası A.Ş., Ar-Ge Merkezi, Bursa/ Türkiye

²zafer.guler2@tofas.com.tr; Tofaş Türk Otomobil Fabrikası A.Ş., Ar-Ge Merkezi, Bursa/ Türkiye

³ibrahim.inan@tofas.com.tr; Tofaş Türk Otomobil Fabrikası A.Ş., Ar-Ge Merkezi, Bursa/ Türkiye

⁴murat.akdogan@tofas.com.tr; Tofaş Türk Otomobil Fabrikası A.Ş., Ar-Ge Merkezi, Bursa/ Türkiye

Özet

Bu çalışmada, şehir içi ulaşımında yaygınlaşan mikro mobilite araçlarında yük taşımacılığına yönelik arka süspansiyon sistemi tasarımları incelenmektedir. Mikro mobilite araçları; trafik yoğunluğunu azaltma, kısa mesafelerde hızlı ve ekonomik ulaşım sağlama, park alanı gereksinimini düşürme ve nihai dağıtım süreçleri etkin çözümler sunma gibi avantajlar sağlamaktadır. Bununla birlikte, artan taşıma kapasitesi gereksinimleri, bu araçların süspansiyon sistemlerinde yapısal dayanım ve kinematik performans açısından iyileştirmeleri gerekli kılmaktadır. Bu kapsamda, salıncak kolu süspansiyon sisteminin farklı konsept tasarımları ele alınmış, tekerlek hizalama açıları ve tekerlek hareket mesafesi gibi parametreler üzerinden karşılaştırmalı analizler gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, tasarım değişkenlerinin araç stabilitesi ve sürüş konforu üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda Y tipi dikdörtgen profil arka salıncak kolunun tekerlek hizalama açılarına ve araç stabilitesine belirgin şekilde fayda sağladığı gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Arka salıncak kolu, Mikromobilite, Süspansiyon Kinematiği, Yük Kapasitesi

Abstract

In this study, rear suspension system designs for cargo transportation in micro-mobility vehicles, which have become widespread in urban transportation, are investigated. Micro-mobility vehicles provide significant advantages such as reducing traffic congestion, offering fast and economical transportation for short distances, reducing parking space requirements, and providing effective solutions for last-mile delivery processes. However, increasing payload capacity requirements necessitate improvements in both structural durability and kinematic performance of these vehicles' suspension systems. Within this scope, different concept designs of the trailing arm suspension system are examined, and comparative analyses are conducted based on kinematic parameters such as wheel alignment angles and wheel travel distance. In addition, the effects of design variables on vehicle stability and ride comfort are evaluated. As a result of the analyses, it was observed that the Y-type rectangular profile rear trailing arm design provides a more balanced behavior in terms of wheel alignment angles and offers a significant advantage in vehicle stability.

Keywords: Load Capacity, Micromobility, Suspension Kinematic, Trailing Arm

1.GİRİŞ

Mikromobilite araçları, özellikle büyük şehirlerde artan trafik yoğunluğu, çevresel kaygılar ve sürdürülebilir ulaşım politikaları doğrultusunda son yıllarda önemli bir alternatif ulaşım çözümü olarak öne çıkmaktadır. Elektrikli scooterlar, kompakt elektrikli araçlar ve benzeri hafif taşıtlar; düşük enerji tüketimi, kısa mesafelerde yüksek verimlilik ve karbon salınımını azaltma potansiyeli ile kentsel ulaşım sistemlerinde giderek daha yaygın bir kullanım alanı bulmaktadır (Ergün, 2019).

Bu araçların kullanım alanlarının genişlemesi yalnızca bireysel ulaşım ile sınırlı kalmayıp, aynı zamanda son kilometre lojistiği ve hafif yük taşımacılığı gibi uygulama alanlarını da kapsamaktadır. Bu durum, araçların taşıma kapasitesinin artırılmasını gerektirmekte ve buna bağlı olarak özellikle süspansiyon sistemleri üzerinde önemli tasarım ve dayanım problemleri ortaya çıkarmaktadır. Artan yükler, araç gövdesi ile yol arasındaki dinamik etkileşimi değiştirerek sürüş konforu, yol tutuş performansı ve yapısal güvenlik üzerinde doğrudan etkili olmaktadır (Dikmen, 2016).

Süspansiyon sistemleri içerisinde salıncak kolu geometrisi, tekerlek hareketinin kinematik karakteristiğini belirleyen en kritik tasarım parametrelerinden biridir. Kamber ve toe açıları gibi tekerlek hizalama parametreleri, aracın yön kararlılığı, yol tutuş kabiliyeti ve genel dinamik davranışı üzerinde belirleyici rol oynamaktadır. Literatürde, süspansiyon geometrisinin optimize edilmesinin hem kinematik performans hem de sürüş stabilitesi açısından önemli iyileştirmeler sağladığı vurgulanmaktadır (Bayrakçıken, 2018; Yıldırım & Şahin, 2021).

Buna ek olarak, güncel otomotiv mühendisliği yaklaşımlarında süspansiyon tasarımlarının yalnızca kinematik açıdan değil, aynı zamanda yapısal dayanım ve yorulma davranışı açısından da bütüncül olarak değerlendirilmesi gerektiği belirtilmektedir. Bu kapsamda, farklı yükleme senaryoları altında güvenli çalışma aralığının sağlanması, özellikle yük taşıyan mikro mobilite araç tasarımlarında kritik bir mühendislik kriteri haline gelmiştir (TMMOB Makina Mühendisleri Odası, 2022).

Bu çalışma kapsamında, mikro mobilite araçlar için üç farklı arka salıncak kolu tasarımı (sac, dikdörtgen profil düz ve Y tipi) incelenmiş; kinematik analizler ile tekerlek hizalama davranışları değerlendirilmiş ve yapısal analizler ile tasarımların dayanım performansları karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda tasarım geometrisinin araç dinamiği ve yapısal güvenlik üzerindeki etkileri ortaya konmuştur.

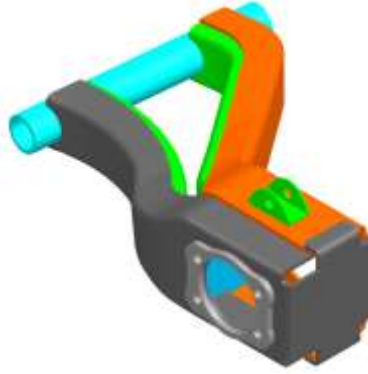
2.YÖNTEM

Bu çalışmada, arka süspansiyonda tekerlek, yarım akslar, amortisör ve gövde ile bağlantı sağlayacak, kinematik açıdan teker maksimum hareketlerine göre uygun tekerlek açılarını sağlayacak bir salıncak kolu tasarımı elde etmek hedeflenmiştir.

2.1. Salıncak Kolu Modelleme Süreci

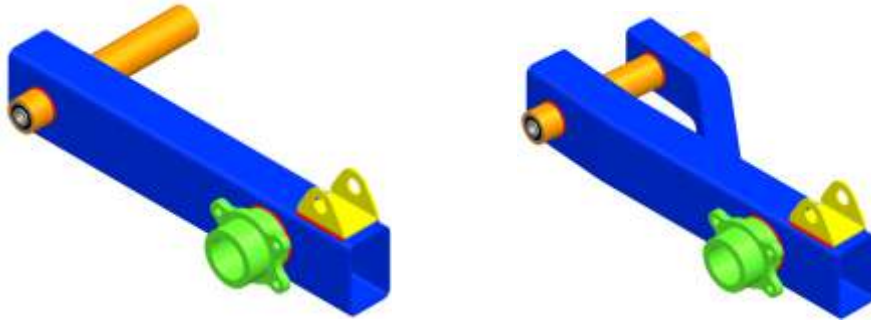
İlk aşamada, araç geometrik noktalarına uygun ve belirlenen çalışma hacmi içerisinde diğer komponentler ile girişim yapmayacak şekilde Siemens NX CAD yazılımı kullanılarak üç farklı salıncak kolu modellenmiştir. İlk model kaynaklı birleştirme metoduna uygun olarak sac parça tasarımı olarak

gerçekleştirilmiştir. (Şekil 1.) Diğer iki modelde yine kaynaklı birleştirme metoduna uygun olarak dikdörtgen profil olarak düz ve y tipi olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. (Şekil 2)



Şekil 1. Sac Parça Salıncak Kolu

Diğer iki modelde yine kaynaklı birleştirme metoduna uygun olarak dikdörtgen profil olarak gerçekleştirilmiştir. (Şekil 2)



Şekil 2. Dikdörtgen Profil Düz ve Y Tipi Salıncak Kolu

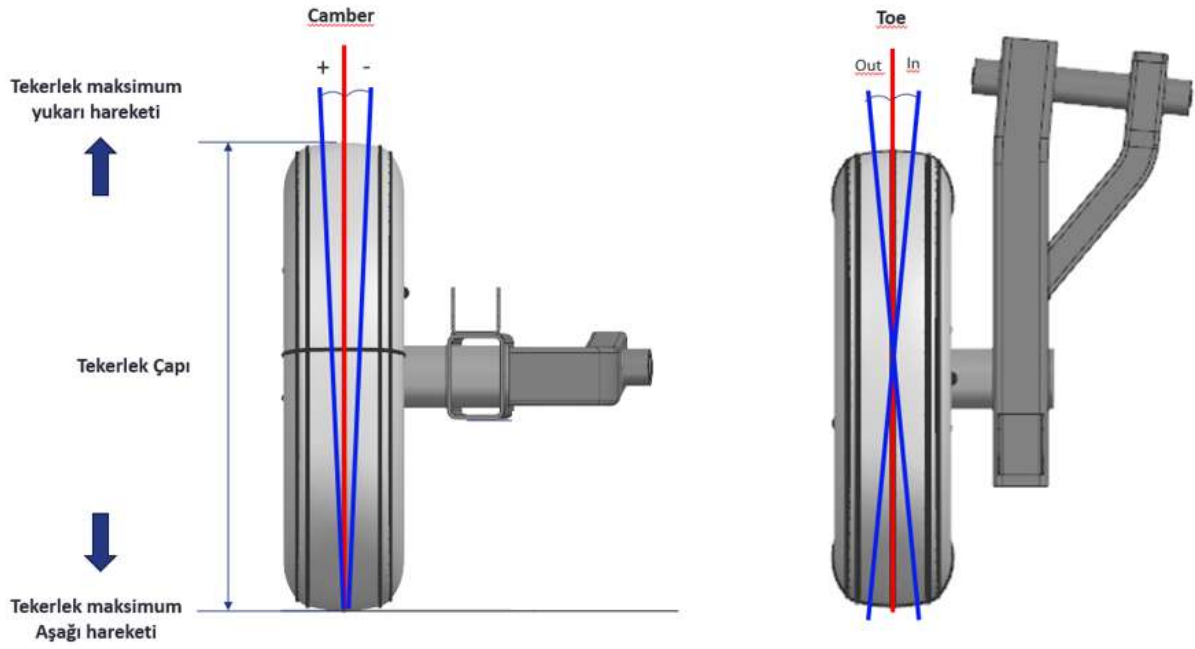
2.2. Araç İsterleri ve Sınır Koşulları

Tasarım sürecinde aşağıda belirtilen araç istekleri ve sınır koşulları dikkate alınmıştır.

- Tekerlek maksimum yukarı hareketi
- Tekerlek maksimum aşağı hareketi
- Tekerlek çapı

2.3. Kinematik Analiz Süreci

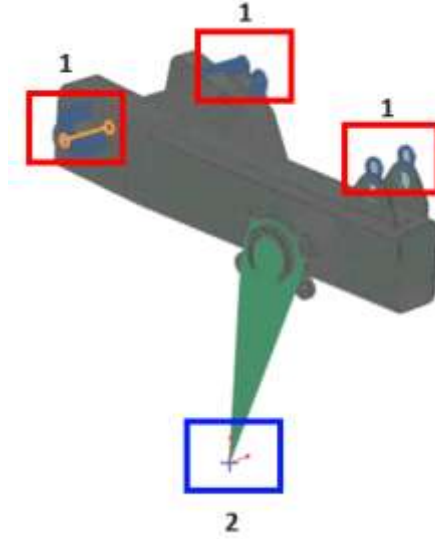
Kinematik analizler Siemens NX makro yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Her bir model araç konumuna getirilerek teker hareketlerine göre kamber-toe değişimleri analiz edilmiştir. (Şekil 3)



Şekil 3. Teker Hareketlerine Göre Kamber-Toe değişimleri

2.4. Yapısal Sanal Analiz Süreci

Yapısal sanal analizler Siemens NX Simcenter yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Genel olarak 3 mm, lokal olarak 0.75 mm' lik tetrahedral mesh atamaları uygulanmıştır. 1 nolu bölgelerden (Amortisör ve Gövde bağlantıları) kısıtlamalar, 2 nolu bölgeden de RBE2 eleman ile lateral Y ekseninde kuvvet verilmiştir. (Şekil 4)



Şekil 4. Kuvvet ve Kısıtlama Bölgeleri

3.BULGULAR

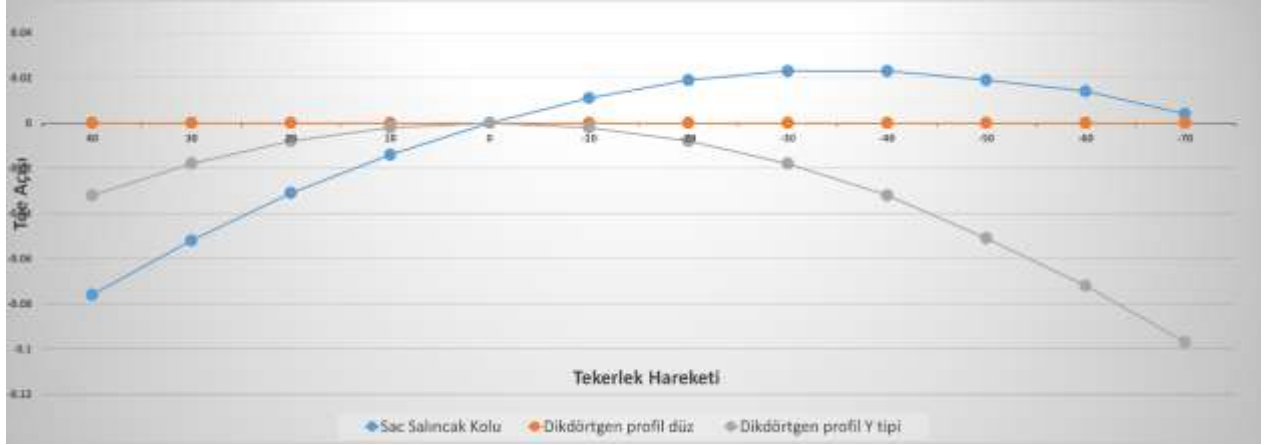
Yapılan analizler ile, mikromobilite araçlar için geliştirilen üç farklı salıncak kolu geometrisinin kinematik davranışları incelenmiştir. Tasarımların tekerlek hareketi boyunca oluşturduğu kamber ve toe değişimleri Z ekseninde 10 mm yer değiştirmeye göre değerlendirilmiştir.

Üç farklı salıncak kolu geometrisine ait kamber değişim grafikleri aşağıdaki gibi elde edilmiştir. (Grafik 1).



Grafik 1. Teker Hareketine Göre Kamber Açısı Değişimi

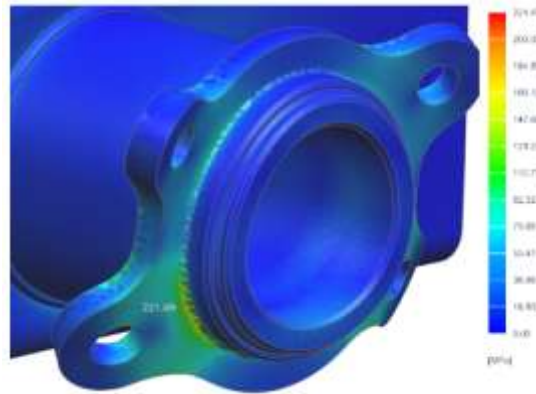
Yine aynı şekilde teker hareketlerine göre yapılan analizler sonucunda toe değişim karakteristikleri çıkarılmıştır. (Grafik 2)



Grafik 2. Teker Hareketine Göre Toe Açısı Değişimi

Grafikler incelendiğinde, tüm tasarımların tekerlek hareketi boyunca farklı kamber ve toe eğilimleri sergilediği görülmektedir.

Şekil 5'te dikdörtgen profil Y tipi tasarıma ait sanal analiz (sonlu elemanlar) sonuçları verilmiştir. Bu analizde yapının yükleme koşulları altında gerilme dağılımı değerlendirilmiş ve Teker bağlantı bölgesinde 221 MPa maksimum gerilme elde edilmiştir.



Şekil 5. Teker Bağlantı Bölgesi Gerilme Analizi

4.SONUÇ VE TARTIŞMA

Sonuç olarak üç farklı salıncak kolu geometrisinin kinematik ve yapısal davranışları incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, tasarım geometrisinin kamber ve toe değişimleri üzerinde belirleyici olduğunu göstermiştir.

Kinematik analizler sonucunda dikdörtgen profil Y tipi tasarımın tekerlek hareketi boyunca daha dengeli bir kamber ve toe davranışı sergilediği belirlenmiştir. Bu durumun, mikromobilite araçlarda yön kararlılığı ve yol tutuş performansı açısından daha uygun bir yapı sunduğu değerlendirilmiştir.

Sac salıncak kolu tasarımının özellikle tekerlek hareketi sırasında daha belirgin toe ve kamber değişimleri sergilediği, dikdörtgen profil düz tasarımın ise daha nötr bir kinematik davranış gösterdiği gözlemlenmiştir.

Yapısal analiz sonuçlarına göre ise dikdörtgen profil Y tipi tasarımın belirlenen sınır koşulları altında güvenli çalışma aralığında kaldığı görülmüştür.

Genel değerlendirme sonucunda hem de yapısal açıdan dikdörtgen profil Y tipi tasarımın yük taşıyan mikromobilité araç uygulamaları için en uygun çözüm olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

KAYNAKÇA

Bayrakçeken, H. (2018). *Araç dinamiği ve süspansiyon sistemleri*. İstanbul: Nobel Akademik Yayıncılık.

Dikmen, M. (2016). *Taşıt tekniği ve araç mekaniği*. Ankara: Seçkin Yayıncılık.

Ergün, M. (2019). *Otomotiv mühendisliğine giriş*. Bursa: Dora Yayınları.

Kılıç, S. E. (2020). Araç süspansiyon sistemlerinin dinamik davranışlarının incelenmesi. *Politeknik Dergisi*, 23(4), 1453–1462.

Yıldırım, A., & Şahin, M. (2021). Elektrikli araçlarda süspansiyon tasarımının performansa etkisi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 36(2), 879–888.

TMMOB Makina Mühendisleri Odası. (2022). *Otomotiv teknolojileri ve güncel gelişmeler raporu*. Ankara: MMO Yayınları.

Yapısal Macunların Araç Gövde Performansı Üzerindeki Etkisi

Ferhat Can KÖSE¹, Necdet Selim KOÇYİĞİT², Yağız SELÇUK³

¹: ferhat.cankose@tofas.com.tr, TOFAŞ Türk Otomobil Fabrikası Ar-Ge Merkezi, Bursa/ Türkiye.

² Necdet.selimkocyigit@tofas.com.tr, TOFAŞ Türk Otomobil Fabrikası Ar-Ge Merkezi, Bursa/ Türkiye.

³ yagiz.selcuk@tofas.com.tr, TOFAŞ Türk Otomobil Fabrikası Ar-Ge Merkezi, Bursa/ Türkiye.

Özet

Otomotiv Body-in-White (BIW) yapıları, araç dayanımı, güvenlik performansı ve sürüş karakteristiği açısından araç üretiminin en kritik aşamalarından birini oluşturmaktadır. Son yıllarda yapısal yapıştırıcılar, geleneksel birleştirme yöntemleri ile birlikte kullanılarak BIW yapılarının mekanik performansını iyileştirmede önemli bir rol üstlenmiştir. Bu çalışmada yapısal yapıştırıcıların BIW performansı üzerindeki etkileri; rijitlik, çarpışma dayanımı, titreşim sönümleme ve hafifletme stratejileri açısından değerlendirilmiştir. Yapısal yapıştırıcıların birleşim bölgelerinde yük dağılımını iyileştirdiği ve gerilme yoğunlaşmalarını azalttığı belirlenmiştir. Bunun sonucunda gövde burulma ve eğilme rijitliğinde önemli iyileşmeler sağlanabilmektedir. Ayrıca yapıştırıcı uygulamalarının çarpışma sırasında enerji absorpsiyonunu artırdığı ve NVH performansını iyileştirdiği görülmüştür. Farklı malzemelerin birleştirilmesine olanak sağlaması nedeniyle yapısal yapıştırıcılar hafif araç tasarım stratejileri açısından da önemli avantajlar sunmaktadır. Ancak kürleme süreçleri, çevresel dayanım ve proses entegrasyonu gibi mühendislik problemleri de dikkate alınmalıdır.

Anahtar Kelimeler: BIW, çarpışma dayanımı, hafif tasarım, NVH, yapısal yapıştırıcılar

Abstract

Body in White (BIW) structures represent one of the most critical stages in automotive manufacturing, directly influencing vehicle durability, safety, and overall performance. In recent years, structural adhesives have increasingly been used alongside traditional joining methods such as spot welding to enhance the mechanical behavior of BIW assemblies. This study investigates the effects of structural adhesives on BIW performance, focusing on stiffness, crashworthiness, vibration damping, and weight optimization. Structural adhesives contribute to improved load distribution across joints, reducing stress concentrations typically observed in spot-welded connections. As a result, global torsional and bending stiffness of the BIW structure can be significantly enhanced. Additionally, the integration of adhesives improves energy absorption characteristics during crash events, thereby increasing passenger safety. Another important advantage is the reduction of noise, vibration, and harshness (NVH) levels due to the damping properties of adhesive materials. Furthermore, the use of structural adhesives allows for the joining of dissimilar materials, supporting lightweight design strategies that are essential for improving fuel efficiency and reducing emissions. However, challenges such as curing time, process integration, and long-term durability under environmental effects must also be considered. In conclusion, structural adhesives play a vital role in modern BIW

design by enhancing structural integrity, safety performance, and comfort characteristics, while also enabling lightweight construction.

Keywords: BIW, crashworthiness, lightweight design, NVH, structural adhesives

GİRİŞ

Otomotiv sektöründe artan güvenlik gereksinimleri, emisyon hedefleri ve hafif araç tasarımına yönelik ihtiyaçlar, araç gövde yapılarında kullanılan birleştirme teknolojilerinin gelişimini hızlandırmıştır. Geleneksel olarak otomotiv BIW (Body-in-White) yapılarında direnç nokta kaynağı en yaygın kullanılan birleştirme yöntemi olmasına rağmen, modern araç platformlarında yapısal yapıştırıcı teknolojileri giderek daha fazla önem kazanmaktadır (Adams, 2005). Yapısal yapıştırıcılar, birleşim bölgelerinde yüklerin daha geniş alanlara yayılmasını sağlayarak lokal gerilme yoğunlaşmalarını azaltabilmektedir. Bu durum, özellikle spot kaynaklı bağlantılarda görülen gerilme birikimlerinin azaltılması açısından önemli avantajlar sunmaktadır (da Silva & Öchsner, 2008). Ayrıca yapısal yapıştırıcıların kullanımı ile birlikte araç gövdesinin burulma ve eğilme rijitliği artırılabilir. Günümüzde elektrikli araç platformlarının yaygınlaşmasıyla birlikte çok malzemeli gövde yapıları daha fazla kullanılmaya başlanmıştır. Alüminyum, gelişmiş yüksek dayanımlı çelikler (AHSS) ve kompozit malzemelerin aynı yapı içerisinde birlikte kullanılabilmesi için farklı birleştirme teknolojilerine ihtiyaç duyulmaktadır. Yapısal yapıştırıcılar, farklı malzemelerin güvenilir şekilde birleştirilmesine olanak sağlaması açısından kritik bir rol üstlenmektedir (Barnes & Pashby, 2000). Bunun yanında yapısal yapıştırıcılar, titreşim sönümleme özellikleri sayesinde araç içi NVH (Noise, Vibration and Harshness) performansının iyileştirilmesine katkıda bulunmaktadır. Özellikle panel titreşimlerinin azaltılması ve akustik konforun artırılması açısından önemli avantajlar sunmaktadır (Baldan, 2004). Bu çalışmanın amacı, otomotiv BIW yapılarında kullanılan yapısal yapıştırıcıların gövde performansı üzerindeki etkilerini değerlendirmektir. Çalışma kapsamında rijitlik, çarpışma performansı, NVH davranışı ve hafifletme stratejileri açısından yapısal yapıştırıcı teknolojileri incelenmiştir.

YÖNTEM

Bu çalışma, otomotiv BIW (Body-in-White) yapılarında kullanılan yapısal yapıştırıcıların araç gövde performansı üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla sistematik literatür taraması yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Araştırma kapsamında ScienceDirect, Springer, SAE International, Elsevier, Taylor & Francis ve MDPI veri tabanlarında yayımlanan akademik makaleler, teknik raporlar ve endüstriyel uygulama çalışmaları incelenmiştir. Literatür taramasında özellikle 2000 yılı sonrası yayımlanan çalışmalar dikkate alınmış; otomotiv sektöründe kullanılan yapısal yapıştırıcı teknolojilerinin rijitlik, çarpışma dayanımı, NVH performansı, yorulma davranışı ve hafifletme stratejileri üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir.

Çalışma kapsamında epoksi bazlı yapısal yapıştırıcı sistemleri, poliüretan bazlı yapıştırıcılar, hibrit bağlantı teknolojileri ve yapıştırıcı destekli nokta kaynak (weld-bonding) uygulamaları incelenmiştir. Özellikle spot weld bonding yöntemlerinde kaynak noktaları ile yapıştırıcı kombinasyonunun yük dağılımını iyileştirdiği ve birleşim bölgelerindeki gerilme yoğunlaşmalarını azalttığı belirtilmiştir.

Ayrıca otomotiv gövde yapılarında kullanılan farklı yapıştırıcı tiplerinin mekanik özellikleri; kesme dayanımı, soyulma dayanımı, darbe dayanımı ve yorulma ömrü açısından karşılaştırılmıştır.

Araştırmada aşağıdaki performans kriterleri değerlendirilmiştir:

- Burulma rijitliği,
- Eğilme rijitliği,
- Çarpışma enerji absorpsiyonu,
- NVH (Noise, Vibration and Harshness) performansı,
- Yorulma dayanımı,
- Hafifletme potansiyeli,
- Farklı malzeme birleştirme kabiliyeti.

Literatürde yer alan deneysel çalışmalarda özellikle tek bindirmeli bağlantılar (single-lap joints), T-bağlantılar ve BIW panel birleşimleri üzerinde gerçekleştirilen çekme, kesme ve yorulma testleri incelenmiştir. Yapısal yapıştırıcıların spot kaynaklı bağlantılara kıyasla daha homojen yük aktarımı sağladığı ve lokal gerilme yoğunlaşmalarını azalttığı rapor edilmiştir. Bunun yanında hibrit bağlantı yöntemlerinin çatlak ilerleme davranışını geciktirdiği ve bağlantı ömrünü artırdığı belirtilmiştir. Çarpışma performansı değerlendirmelerinde frontal darbe, yandan çarpma ve burkulma senaryolarına ait çalışmalar incelenmiştir. Yapısal yapıştırıcı kullanılan birleşim bölgelerinde enerji absorpsiyon kapasitesinin arttığı ve deformasyon davranışının daha kontrollü gerçekleştiği görülmüştür. Ayrıca yapıştırıcı uygulamalarının yüksek hızlı darbe koşullarında bağlantı stabilitesini artırdığı değerlendirilmiştir. NVH performansı açısından yapıştırıcıların viskoelastik özellikleri incelenmiştir. Literatürde yapısal yapıştırıcıların panel titreşimlerini azaltarak araç içi akustik konfor seviyesini iyileştirdiği belirtilmektedir. Özellikle ince sac panellerde titreşim genliklerinin azaldığı ve düşük frekanslı rezonans davranışının iyileştirildiği rapor edilmiştir. Araştırma kapsamında hafifletme stratejileri açısından çok malzemeli gövde yapıları da değerlendirilmiştir. Alüminyum, gelişmiş yüksek dayanımlı çelikler (AHSS) ve kompozit malzemelerin aynı yapı içerisinde kullanılabilmesi için yapısal yapıştırıcıların önemli avantajlar sağladığı görülmüştür. Yapıştırıcı teknolojilerinin mekanik bağlantı elemanı ihtiyacını azaltarak toplam araç ağırlığının düşürülmesine katkı sağladığı belirlenmiştir. Bunun yanında yapısal yapıştırıcı uygulamalarında karşılaşılan mühendislik problemleri de incelenmiştir. Kurlama süresi, yüzey hazırlığı gereksinimleri, sıcaklık dayanımı, nem etkileri ve çevresel yaşlandırma davranışları değerlendirilmiştir. Özellikle yetersiz yüzey temizliği durumunda aderans kaybı oluşabileceği ve uzun dönem dayanım performansının olumsuz etkilenebileceği belirtilmiştir. Elde edilen tüm veriler karşılaştırmalı tablolar ve literatür analizleri ile değerlendirilmiştir. Yapısal yapıştırıcıların BIW yapılarındaki mekanik performans, güvenlik, akustik konfor ve hafifletme üzerindeki etkileri sistematik olarak analiz edilmiştir.

BULGULAR

Literatür incelemeleri sonucunda yapısal yapıştırıcı kullanımının BIW yapılarında gövde rijitliğini önemli ölçüde artırdığı belirlenmiştir. Özellikle spot kaynaklı birleşimlere kıyasla yüklerin daha geniş yüzey alanlarına yayılması sayesinde birleşim bölgelerindeki gerilme yoğunlaşmalarının azaldığı görülmüştür. Yapıştırıcı destekli hibrit bağlantı teknolojilerinin torsiyonel rijitlikte %15–30 seviyelerine kadar iyileşme sağlayabildiği rapor edilmiştir. BIW yapılarında yapısal macun uygulamasına ait görsel Şekil 1’deki gibidir.



Şekil 1. Yapısal Macun Uygulaması

Yapısal yapıştırıcıların eğilme rijitliği ve yorulma dayanımı üzerinde de olumlu etkiler oluşturduğu belirlenmiştir. Yapıştırıcı uygulamaları sayesinde birleşim bölgelerinde çatlak başlangıcının geciktiği ve yorulma ömrünün arttığı görülmüştür. Özellikle sürekli yük aktarımı sağlayan yapıştırıcı katmanının gerilme dağılımını iyileştirdiği değerlendirilmiştir. Çarpışma performansı açısından değerlendirildiğinde, yapısal yapıştırıcı kullanılan BIW yapılarında enerji absorpsiyon kapasitesinin arttığı belirlenmiştir. Frontal ve yandan çarpma senaryolarında birleşim bölgelerinde daha kontrollü deformasyon davranışı elde edildiği rapor edilmiştir. Bunun sonucunda yolcu kabini deformasyonlarının azaltılabildiği ve çarpışma güvenliğinin artırılabilirdiği görülmüştür. NVH performansı açısından yapıştırıcıların viskoelastik davranışı sayesinde titreşim sönümleme özelliği sağladığı belirlenmiştir. Panel titreşim seviyelerinde azalma meydana geldiği ve araç içi akustik konforun iyileştiği görülmüştür. Özellikle ince gövde panellerinde rezonans davranışının azaltıldığı rapor edilmiştir. Hafifletme stratejileri açısından yapısal yapıştırıcıların farklı malzemelerin birleştirilmesine olanak sağladığı belirlenmiştir. Alüminyum–çelik ve kompozit–metal hibrit yapılarda yapıştırıcı kullanımının bağlantı güvenilirliğini artırdığı ve mekanik bağlantı elemanı ihtiyacını azalttığı görülmüştür. Bu durumun toplam araç ağırlığının azaltılmasına katkı sağladığı değerlendirilmiştir. Bununla birlikte kürleme

süreleri, yüzey hazırlığı gereksinimleri ve çevresel yaşlandırma etkileri önemli mühendislik problemleri arasında yer almaktadır. Özellikle yüksek sıcaklık ve nem koşullarında yapıştırıcı performansında azalma meydana gelebileceği belirtilmiştir.

Tablo 1’de, yapısal yapıştırıcıların otomotiv BIW (Body-in-White) yapıları üzerindeki temel performans etkileri özetlenmiştir. Literatür incelemeleri sonucunda yapısal yapıştırıcı kullanımının özellikle burulma ve eğilme rijitliğini artırdığı, birleşim bölgelerinde daha homojen yük dağılımı sağlayarak gövde stabilitesini iyileştirdiği belirlenmiştir. Ayrıca çarpışma sırasında enerji absorpsiyon kapasitesini artırarak yolcu güvenliğine katkı sağladığı görülmüştür. Yapıştırıcıların viskoelastik davranışı sayesinde titreşim seviyelerinde azalma meydana gelmekte ve araç içi akustik konfor iyileşmektedir. Bunun yanında yorulma dayanımının artması servis ömrünü uzatırken, farklı malzemelerin birleştirilmesine olanak sağlaması hafif ve çok malzemeli araç tasarımlarını desteklemektedir.

Tablo 1. *Yapısal Yapıştırıcıların BIW Performansına Etkileri*

Performans Parametresi	Yapısal Yapıştırıcı Etkisi	Sağlanan Avantaj
Burulma Rijitliği	Artış	Gövde stabilitesi
Eğilme Rijitliği	Artış	Daha düşük deformasyon
Çarpışma Enerji Absorpsiyonu	İyileşme	Yolcu güvenliği
NVH Performansı	Titreşim azalması	Akustik konfor
Yorulma Dayanımı	Artış	Daha uzun servis ömrü
Hafifletme Potansiyeli	Yüksek	Daha düşük araç ağırlığı
Farklı Malzeme Birleşimi	Kolaylaşma	Çok malzemeli tasarım

SONUÇ VE TARTIŞMA

Bu çalışmada otomotiv BIW yapılarında kullanılan yapısal yapıştırıcıların gövde performansı üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, yapısal yapıştırıcıların modern araç gövde tasarımlarında önemli mühendislik avantajları sağladığını göstermektedir. Özellikle birleşim bölgelerindeki yük dağılımının iyileştirilmesi sayesinde gövde rijitliği ve yorulma dayanımı artırılabilir. Ayrıca çarpışma performansı ve enerji absorpsiyon kapasitesi açısından önemli iyileşmeler sağlandığı belirlenmiştir. Yapısal yapıştırıcıların NVH performansına katkıları da modern otomotiv tasarımlarında önemli avantajlar sunmaktadır. Bunun yanında farklı malzemelerin birleştirilmesine olanak sağlaması nedeniyle hafif araç tasarım stratejilerinde kritik bir rol üstlenmektedir.

Ancak yapıştırıcı uygulamalarında kürlendirme süreçleri, çevresel dayanım ve üretim entegrasyonu gibi mühendislik problemlerinin dikkatle yönetilmesi gerekmektedir. Gelecekte yapılacak çalışmalarda elektrikli araç platformlarında kullanılan çok malzemeli gövde yapılarında yapısal yapıştırıcı uygulamalarının optimizasyonu, dijital simülasyon yöntemleri ve çevre dostu yapıştırıcı teknolojilerinin geliştirilmesi önemli araştırma alanları arasında yer almaktadır.

KAYNAKÇA

- Adams, R. D. (2005). *Structural adhesive joints in engineering*. Springer.
- Baldan, A. (2004). Adhesively-bonded joints in metallic alloys, polymers and composite materials: Mechanical and environmental durability performance. *Journal of Materials Science*, 39(1), 1–49. <https://doi.org/10.1023/B:JMSC.0000007729.06654.89>
- Barnes, T. A., & Pashby, I. R. (2000). Joining techniques for aluminium spaceframes used in automobiles. *Journal of Materials Processing Technology*, 99(1–3), 72–79. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(99\)00351-2](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(99)00351-2)
- Cognard, J. Y. (2005). *Joint assemblies and adhesive bonding*. ISTE Ltd.
- da Silva, L. F. M., & Öchsner, A. (2008). *Modeling of adhesively bonded joints*. Springer.
- Grant, L. D. R., Adams, R. D., & da Silva, L. F. M. (2009). Experimental and numerical analysis of single-lap joints for the automotive industry. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 29(4), 405–413. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2008.06.001>
- Kinloch, A. J. (1987). *Adhesion and adhesives: Science and technology*. Chapman and Hall.
- Messler, R. W. (2004). *Joining of materials and structures: From pragmatic process to enabling technology*. Elsevier.

Otomotiv Uygulamalarında Gelişmiş Yüksek Dayanımlı Çeliklerin Tasarım Kısıtları ve Üretilbilirlik Açısından Değerlendirilmesi

Ferhat Can KÖSE¹, Necdet Selim KOÇYİĞİT², Yağız SELÇUK³

¹ ferhat.cankose@tofas.com.tr, TOFAŞ Türk Otomobil Fabrikası Ar-Ge Merkezi, Bursa/ Türkiye.

² Necdet.selimkocyigit@tofas.com.tr, TOFAŞ Türk Otomobil Fabrikası Ar-Ge, Merkezi Bursa/ Türkiye.

³ yagiz.selcuk@tofas.com.tr, TOFAŞ Türk Otomobil Fabrikası Ar-Ge Merkezi, Bursa/ Türkiye.

Özet

Gelişmiş yüksek dayanımlı çelikler (AHSS), otomotiv sektöründe hafif araç tasarımı, çarpışma dayanımı ve emisyon azaltımı hedeflerinin gerçekleştirilmesinde kritik bir rol oynamaktadır. Geleneksel çeliklere kıyasla daha yüksek mekanik dayanım sağlayan AHSS malzemeler, üretim süreçlerinde şekillendirilebilirlik, geri esneme (springback), kenar çatlağı oluşumu ve kaynaklanabilirlik gibi çeşitli üretilbilirlik problemlerini de beraberinde getirmektedir. Bu çalışmada, otomotiv gövde yapılarında kullanılan AHSS sac malzemelerin tasarım kısıtları ve üretilbilirlik problemleri literatür tabanlı olarak incelenmiştir. Çalışma kapsamında AHSS mikro yapıları, mekanik davranışları, şekillendirme limit diyagramları, geri esneme davranışları, delik genişleme performansları ve birleştirme teknolojileri değerlendirilmiştir. Ayrıca sonlu elemanlar analizleri ve üretilbilirlik odaklı tasarım yaklaşımlarının üretim risklerini azaltmadaki etkileri ele alınmıştır. Sonuç olarak AHSS kullanımında başarılı bir tasarım süreci için malzeme seçimi, proses optimizasyonu, takım tasarımı ve simülasyon tabanlı doğrulama süreçlerinin entegre şekilde yürütülmesi gerektiği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: AHSS, geri esneme, otomotiv sacları, üretilbilirlik, şekillendirme

Abstract

Advanced High Strength Steels (AHSS) play a critical role in achieving lightweight vehicle design, improved crashworthiness, and reduced emissions in the automotive industry. Compared to conventional steels, AHSS grades provide superior mechanical strength; however, they also introduce significant manufacturability challenges such as springback, edge cracking sensitivity, limited formability, and weldability issues. In this study, the primary design constraints and manufacturability problems associated with AHSS sheet metals used in automotive body structures are investigated through a literature-based approach. The study evaluates AHSS microstructures, mechanical behaviors, forming limit diagrams, springback mechanisms, hole expansion performance, and joining technologies. Furthermore, the role of finite element analysis and Design-for-Manufacturing methodologies in reducing production risks is discussed. The findings indicate that successful integration of AHSS materials into automotive structures requires a multidisciplinary approach involving material selection, process optimization, tooling strategies, and simulation-driven

validation. It is concluded that early-stage manufacturability assessment is essential to fully utilize the performance advantages of AHSS materials while minimizing production-related risks.

Keywords: AHSS, automotive sheet metal, formability, manufacturability, springback

GİRİŞ Otomotiv endüstrisinde artan güvenlik gereksinimleri, yakıt tüketimi hedefleri ve emisyon regülasyonları, araç gövde yapılarında yüksek dayanımlı malzeme kullanımını önemli ölçüde artırmıştır. Özellikle gelişmiş yüksek dayanımlı çelikler (Advanced High Strength Steels- AHSS), yüksek mukavemet ve düşük ağırlık avantajları sayesinde modern araç gövde yapılarında yaygın şekilde kullanılmaktadır. AHSS malzemeler; çift fazlı (DP), dönüşüm indüklemeli plastisite (TRIP), martenzitik ve kompleks fazlı çelikler gibi farklı mikro yapı sınıflarını içermektedir (Keeler, Kimchi, & Mooney, 2007). AHSS malzemeler, çarpışma performansını artırırken araç ağırlığını azaltabilmektedir. Ancak bu yüksek dayanım seviyeleri, üretim süreçlerinde çeşitli zorlukları da beraberinde getirmektedir. Özellikle şekillendirme operasyonlarında geri esneme davranışı, kalıp kompanzasyonu ihtiyacı, kenar çatlaması ve şekillendirme limitlerinin daralması önemli üretim problemleri oluşturmaktadır. Ayrıca yüksek mukavemet seviyeleri nedeniyle kaynak proseslerinde elektrot aşınması ve kaynak kalitesi problemleri ortaya çıkabilmektedir (Koç & Altan, 2001). Literatürde AHSS malzemelerin üretilebilirlik performansını etkileyen birçok parametre incelenmiştir. Şekillendirme limit diyagramları (FLD), geri esneme analizleri ve delik genişleme testleri bu çalışmaların temelini oluşturmaktadır (Keeler et al., 2007). Son yıllarda sonlu elemanlar analizlerinin gelişmesiyle birlikte üretim öncesi sanal doğrulama süreçleri önem kazanmıştır. Böylece üretim hataları henüz prototip aşamasına geçmeden analiz edilebilmektedir (Neugebauer, Altan, Geiger, Kleiner, & Sterzing, 2006). Bu çalışmanın amacı, otomotiv gövde uygulamalarında kullanılan AHSS malzemelerin temel tasarım kısıtlarını ve üretilebilirlik problemlerini kapsamlı şekilde değerlendirmektir. Ayrıca üretim süreçlerinde karşılaşılan problemlerin azaltılmasına yönelik mühendislik yaklaşımlarının incelenmesi hedeflenmiştir.

YÖNTEM

Bu çalışma, otomotiv gövde yapılarında kullanılan gelişmiş yüksek mukavemetli çeliklerin (advanced high strength steels [AHSS]) üretilebilirlik açısından değerlendirilmesine yönelik kapsamlı bir literatür taraması olarak gerçekleştirilmiştir. Araştırma kapsamında ScienceDirect, Springer, SAE International, Taylor & Francis, MDPI ve ResearchGate veri tabanlarında yayımlanan akademik makaleler, teknik raporlar ve endüstriyel uygulama çalışmaları incelenmiştir. Literatür taramasında özellikle 2010 sonrası yayımlanan güncel çalışmalar dikkate alınmış; otomotiv sektöründe yaygın olarak kullanılan AHSS malzemelerin şekillendirme performansı, geri esneme davranışı, kaynaklanabilirlik özellikleri ve sonlu elemanlar analiz yöntemleri üzerine yoğunlaşmıştır. Araştırma kapsamında DP600, DP780, TRIP780, kompleks fazlı (complex phase [CP]) çelikler ve martenzitik çelikler gibi farklı AHSS sınıfları değerlendirilmiştir. İncelenen çalışmalarda akma dayanımı, çekme dayanımı, toplam uzama oranı, sertlik dağılımı ve enerji sönümleme kapasitesi gibi temel mekanik özellikler karşılaştırılmıştır. Bunun yanında otomotiv BIW (body in white) yapılarında kullanılan bu malzemelerin hafifletme potansiyeli ile çarpışma dayanımı arasındaki ilişki analiz edilmiştir (Keeler, Kimchi, & Mooney, 2007).

Şekillendirme performansının değerlendirilmesinde şekillendirme limit diyagramları (forming limit diagram/forming limit curve [FLD/FLC]), tek eksenli çekme testleri, delik genişleme oranı (hole expansion ratio [HER]) testleri ve bükme testleri incelenmiştir. Özellikle çok fazlı mikroyapıya sahip AHSS malzemelerde lokal incelme, kenar çatlakları ve yüzey çatlamlarının daha yaygın görüldüğü tespit edilmiştir. Ayrıca geleneksel FLD yöntemlerinin AHSS malzemelerde oluşan ani kırılmaları tam olarak tahmin edemediği ve bu nedenle gelişmiş hasar modellerinin kullanılmasının gerektiği değerlendirilmiştir (Altan, 2015). Araştırmada AHSS malzemelerde üretim sürecinin en kritik problemlerinden biri olan geri esneme (springback) davranışı da detaylı olarak incelenmiştir. Yükseklerde yüksek akma dayanımına sahip DP ve martenzitik çeliklerin elastik geri toparlanma eğilimlerinin daha yüksek olduğu belirtilmektedir. Bu kapsamda U-bükme testleri, V-bükme analizleri ve geometrik sapma ölçümleri değerlendirilmiştir. Özellikle yüksek mukavemet seviyesinin kalıp kompanzasyonu ihtiyacını artırdığı ve üretim toleranslarının kontrolünü zorlaştırdığı belirlenmiştir. Üretilirlik değerlendirmelerinde kullanılan sonlu elemanlar analiz yöntemleri de araştırma kapsamında ele alınmıştır. AutoForm, LS-DYNA ve PAM-STAMP yazılımlarının şekillendirme analizi, incelme dağılımı, kırılma tahmini ve geri esneme simülasyonlarında yaygın olarak kullanıldığı görülmüştür. İncelenen çalışmalarda özellikle malzeme modelleme doğruluğunun geri esneme tahmini ve çatlama analizleri üzerinde kritik etkiye sahip olduğu belirtilmiştir (Yoshida & Uemori, 2002). Ayrıca termo-mekanik analiz yöntemlerinin sıcak şekillendirme uygulamalarında daha başarılı sonuçlar verdiği ifade edilmiştir (Neugebauer et al., 2006). Birleştirme teknolojileri açısından direnç nokta kaynağı (resistance spot welding [RSW]), lazer kaynağı ve yapısal yapıştırıcı destekli hibrit birleştirme yöntemleri incelenmiştir. Literatürde RSW yönteminin otomotiv BIW üretiminde hâlen en yaygın kullanılan birleştirme yöntemi olduğu belirtilmektedir. Ancak AHSS malzemelerin yüksek sertleşebilirlik özellikleri nedeniyle kaynak bölgesinde martenzitik yapı oluşumu, gevrekleşme, elektrot aşınması ve sıvı metal gevrekleşmesi (liquid metal embrittlement [LME]) gibi problemler meydana geldiği ifade edilmektedir (Keeler et al., 2007). Ayrıca kaynak nugget geometrisinin kaynak dayanımı ve kırılma modları üzerinde doğrudan etkili olduğu değerlendirilmiştir. Bunun yanında yapısal yapıştırıcı uygulamalarının bağlantı rijitliğini artırdığı, titreşim sönümleme performansını iyileştirdiği ve geri esneme davranışını azaltabildiği yönündeki çalışmalar incelenmiştir. Spot kaynak ile yapıştırıcının birlikte kullanıldığı hibrit bağlantı yöntemlerinin yorulma dayanımını artırdığı ve yük dağılımını iyileştirdiği görülmüştür (Altan, 2015). Araştırma sürecinde elde edilen tüm veriler karşılaştırmalı tablolar ve literatür analizleri ile değerlendirilmiştir. Malzeme mikroyapısı ile üretim performansı arasındaki ilişki dikkate alınarak; mukavemet artışının şekillendirilebilirlik, geri esneme, kaynaklanabilirlik ve montaj süreçleri üzerindeki etkileri sistematik olarak analiz edilmiştir. Böylece AHSS malzemelerin otomotiv BIW uygulamalarındaki avantajları, üretim kısıtları ve gelecekteki kullanım potansiyelleri bütüncül bir yaklaşımla değerlendirilmiştir.

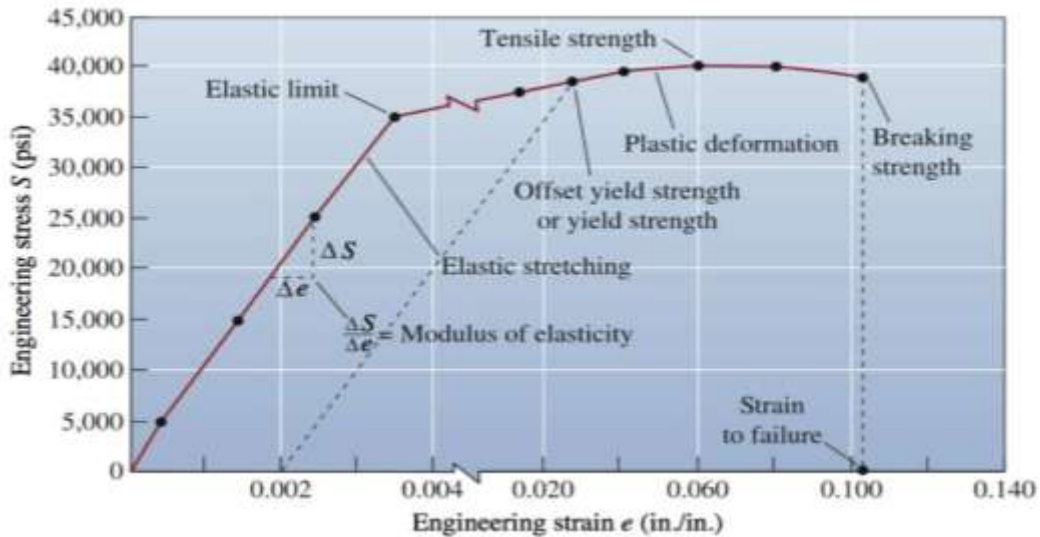
BULGULAR

Literatür incelemeleri sonucunda AHSS malzemelerin geleneksel düşük karbonlu çeliklere göre daha yüksek geri esneme eğilimi gösterdiği belirlenmiştir. Özellikle akma dayanımındaki artışın elastik geri dönüş miktarını artırdığı görülmüştür. Bu durum geometrik tolerans kontrolünü zorlaştırmakta ve kalıp kompanzasyonu ihtiyacını artırmaktadır (Yoshida & Uemori, 2002).

Şekillendirme limit diyagramı analizlerinde AHSS malzemelerin belirli deformasyon bölgelerinde sınırlı şekillendirilebilirlik sergilediği görülmüştür. TRIP çeliklerin yüksek uzama kapasitesi nedeniyle daha iyi şekillendirme performansı sunduğu, martenzitik çeliklerin ise düşük süneklik nedeniyle daha hassas olduğu belirlenmiştir (Keeler, Kimchi, & Mooney, 2007).

Delik genişleme testlerinde kesme kenarı kalitesinin çatlak oluşumu üzerinde önemli etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir. Özellikle yüksek dayanımlı martenzitik çeliklerde kenar çatlağı oluşum riskinin belirgin şekilde arttığı görülmüştür. Kaynak proseslerinde ise elektrot aşınması, kaynak nugget boyutu kontrolü ve termal etkiler önemli problemler olarak belirlenmiştir. Bununla birlikte gelişmiş kaynak parametre optimizasyonlarının kaynak kalitesini artırdığı rapor edilmiştir (Koç & Altan, 2001). Sonlu elemanlar analizlerinin kullanılmasıyla birlikte üretim öncesinde geri esneme tahmini ve çatlak riski analizlerinin yüksek doğrulukla gerçekleştirilebildiği görülmüştür. Bu analizlerin kalıp geliştirme sürelerini azalttığı ve maliyet avantajı sağladığı belirtilmiştir (Neugebauer, Altan, Geiger, Kleiner, & Sterzing, 2006).

Şekil 1’de tipik bir mühendislik gerilme–birim uzama (stress–strain) eğrisi gösterilmektedir. Eğri üzerinde elastik bölge, akma dayanımı, plastik deformasyon bölgesi, çekme dayanımı ve kopma noktası gibi temel mekanik davranış parametreleri tanımlanmıştır. Elastik bölgede malzeme yük kaldırıldığında ilk formuna geri dönerken, akma dayanımının aşılmasıyla birlikte kalıcı plastik deformasyon başlamaktadır. Eğrinin maksimum noktası malzemenin çekme dayanımını temsil ederken, son bölümde kopma uzaması ve kırılma davranışı görülmektedir. Bu eğri, otomotiv malzemelerinin dayanım, şekillendirilebilirlik ve enerji absorpsiyon özelliklerinin değerlendirilmesinde temel mühendislik yaklaşımı olarak kullanılmaktadır.



Şekil 3. Mukavemet – Şekillendirilebilirlik İlişkisi

Tablo 1’de, gelişmiş yüksek dayanımlı çeliklerin (AHSS) otomotiv üretim süreçlerinde karşılaşılan temel üretilebilirlik problemleri, bu problemlerin temel nedenleri ve üretime olan etkileri özetlenmiştir.

AHSS malzemelerin yüksek akma dayanımı geri esneme problemini artırarak boyutsal sapmalara neden olurken, düşük kenar sünekliği kenar çatlağı oluşum riskini yükseltmektedir. Ayrıca yüksek mukavemet seviyeleri elektrot ve kalıp aşınmasını artırarak kaynak kalitesinde düşüşe ve bakım maliyetlerinde artışa yol açabilmektedir. Bu problemler, AHSS malzemelerin üretim süreçlerinde gelişmiş proses optimizasyonu ve simülasyon tabanlı doğrulama yöntemlerinin önemini ortaya koymaktadır.

Tablo 1. AHSS malzemelerde temel üretilebilirlik problemleri

Problem	Temel Neden	Üretim
Geri esneme	Yüksek akma dayanımı	Boyutsal sapmalar
Kenar çatlağı	Düşük kenar sünekliği Yüksek mukavemet	Hurda artışı
Elektrot aşınması	Yüksek şekillendirme kuvveti	Kaynak kalitesi düşüşü
Kalıp aşınması		Bakım maliyetleri

SONUÇ VE TARTIŞMA

Bu çalışmada otomotiv sektöründe kullanılan gelişmiş yüksek dayanımlı çeliklerin temel tasarım kısıtları ve üretilebilirlik problemleri değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, AHSS malzemelerin hafiflik ve güvenlik açısından önemli avantajlar sağladığını; ancak üretim süreçlerinde ciddi mühendislik zorlukları oluşturduğunu göstermektedir. Özellikle geri esneme davranışı, kenar çatlağı oluşumu ve kaynak prosesleri AHSS uygulamalarında kritik mühendislik problemleri olarak öne çıkmaktadır. Bu problemlerin azaltılabilmesi için malzeme mikro yapısının doğru analiz edilmesi, uygun proses parametrelerinin belirlenmesi ve gelişmiş simülasyon yöntemlerinin kullanılması gerekmektedir. Sonlu elemanlar analizlerinin üretim öncesi doğrulama süreçlerinde etkin şekilde kullanılması, üretim risklerinin azaltılması açısından büyük önem taşımaktadır. Ayrıca üretilebilirlik odaklı tasarım yaklaşımının ürün geliştirme sürecinin erken aşamalarında uygulanması, maliyet ve kalite

açısından önemli avantajlar sağlamaktadır. Gelecekte yapılacak çalışmalarda sıcak şekillendirme teknolojileri, hibrit malzeme çözümleri ve yapay zekâ destekli üretim optimizasyon yöntemlerinin AHSS uygulamalarındaki etkilerinin araştırılması önerilmektedir.

KAYNAKÇA

- Altan, T. (2015). *Cold and hot forging: Fundamentals and applications*. ASM International.
- Keeler, S., Kimchi, M., & Mooney, P. (2007). *Advanced high-strength steels application guidelines*. WorldAutoSteel.
- Koç, M., & Altan, T. (2001). An overall review of the tube hydroforming technology. *Journal of Materials Processing Technology*, 108(3), 384–393.
- Neugebauer, R., Altan, T., Geiger, M., Kleiner, M., & Sterzing, A. (2006). Sheet metal forming at elevated temperatures. *CIRP Annals*, 55(2), 793–816. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2006.10.007>
- WorldAutoSteel. (2018). *Advanced high-strength steel application guidelines* (Version 6.0). WorldAutoSteel.
- Yoshida, F., & Uemori, T. (2002). A model of large-strain cyclic plasticity describing the Bauschinger effect and work-hardening stagnation. *International Journal of Plasticity*, 18(5–6), 661–686. [https://doi.org/10.1016/S0749-6419\(01\)00050-X](https://doi.org/10.1016/S0749-6419(01)00050-X)

Otomotiv Araç Gövdesinde Kullanılan Çok Katmanlı Boya Sistemlerinin Yapısal Özellikleri ve Korozyon Koruma Performanslarının Değerlendirilmesi

Ferhat Can KÖSE¹, Necdet Selim KOÇYİĞİT², Yağız SELÇUK³

¹ ferhat.cankose@tofas.com.tr TOFAŞ Türk Otomobil Fabrikası Ar-Ge Merkezi, Bursa/ Türkiye.

² Necdet.selimkocyigit@tofas.com.tr TOFAŞ Türk Otomobil Fabrikası Ar-Ge Merkezi Bursa/ Türkiye.

³ yagiz.selcuk@tofas.com.tr TOFAŞ Türk Otomobil Fabrikası Ar-Ge Merkezi. Bursa/ Türkiye.

Özet

Otomotiv araç gövdeleri; nem, sıcaklık değişimleri, yol tuzları ve çeşitli kimyasal kirleticiler gibi çevresel koşullara sürekli maruz kalmaktadır. Bu çevresel etkiler zamanla korozyon oluşumuna ve yüzey bozulmalarına neden olabilmektedir. Modern otomotiv üretiminde araç gövdesinin uzun ömürlü dayanımını ve yüzey kalitesini koruyabilmek amacıyla çok katmanlı boya sistemleri kullanılmaktadır. Bu sistemler; yüzey ön işlem, fosfat kaplama, elektro kaplama (E-coat), astar, baz kat ve vernik katmanı gibi farklı işlemlere sahip katmanlardan oluşmaktadır. Bu çalışmada otomotiv araç gövdelerinde kullanılan çok katmanlı boya sistemlerinin yapısal özellikleri ve korozyon koruma performansları literatür tabanlı olarak değerlendirilmiştir. Çalışmada her katmanın fonksiyonu, katmanlar arası etkileşimler ve sistemin genel korozyon dayanımına katkıları incelenmiştir. Bulgular, elektro kaplama katmanının temel korozyon korumasını sağladığını; astar ve son katmanların ise çevresel dayanım ve yüzey stabilitesini artırdığını göstermektedir. Ayrıca katman uyumluluğunun uzun dönem boya performansı açısından kritik öneme sahip olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Çok katmanlı boya sistemleri, elektro kaplama, korozyon koruması, otomotiv boya sistemleri, otomotiv gövdesi

Abstract

Automotive body structures are continuously exposed to environmental conditions such as humidity, temperature fluctuations, road salts, and chemical contaminants, which may lead to corrosion and surface degradation over time. In modern automotive manufacturing, multi-layer coating systems are widely used to ensure long-term durability and surface quality of vehicle bodies. These systems generally consist of several functional layers including surface pretreatment, phosphate coating, electrocoat (E-coat), primer, base coat, and clear coat. In this study, the structural characteristics and corrosion protection performance of multi-layer coating systems used in automotive body applications were evaluated through a literature-based approach. The functional role of each coating layer, interlayer interactions, and their contributions to overall corrosion resistance were investigated. The findings indicate that the electrocoat layer provides the primary corrosion protection, while primer and topcoat layers enhance environmental durability and surface stability. Furthermore, coating layer compatibility was found to be critically important for long-term coating performance.

Keywords: Automotive body, automotive coatings, corrosion protection, electrocoat, multi-layer coating systems

GİRİŞ

Otomotiv sektöründe araç gövde yapılarının uzun ömürlü dayanımının sağlanması, müşteri memnuniyeti ve araç güvenliği açısından büyük önem taşımaktadır. Araç gövdeleri kullanım süresi boyunca nem, sıcaklık değişimleri, taş çarpması, yol tuzları ve kimyasal kirleticiler gibi çeşitli çevresel etkilere maruz kalmaktadır. Bu etkiler metal yüzeylerde zamanla korozyon oluşumuna neden olmakta ve hem yapısal dayanımı hem de estetik kaliteyi olumsuz yönde etkilemektedir (Fontana, 1986). Modern otomotiv üretiminde korozyon koruması amacıyla çok katmanlı boya sistemleri kullanılmaktadır. Bu sistemler genellikle yüzey temizleme işlemleri, fosfat kaplama, elektro kaplama (electrocoat/e-coat), astar katmanı, baz boya katmanı ve vernik katmanından oluşmaktadır. Her katman sistem içerisinde farklı bir görevi yerine getirmektedir. Özellikle elektro kaplama katmanı, metal yüzey ile doğrudan temas eden temel korozyon koruma bariyerini oluşturmaktadır (Kendig, Jeanjaquet, Addison, & Waldrop, 2001). Boya sistemlerinde katmanlar arası uyumluluk büyük önem taşımaktadır. Katmanlar arasındaki aderans problemleri, termal gerilmeler veya çevresel etkiler sonucunda boya ayrılması, çatlama ve yüzey deformasyonları meydana gelebilmektedir. Bu nedenle boya sistemlerinin yalnızca görsel kalite açısından değil aynı zamanda mekanik dayanım ve uzun dönem çevresel performans açısından da optimize edilmesi gerekmektedir. Organik kaplamaların koruyucu performansının; geçirgenlik, aderans ve çevresel dayanım özellikleriyle doğrudan ilişkili olduğu belirtilmektedir (Funke, 1997). Literatürde otomotiv boya sistemlerinin korozyon dayanımı üzerine çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Özellikle tuz püskürtme testleri, çevrimsel korozyon testleri ve elektrokimyasal analiz yöntemleri boya sistemlerinin performans değerlendirmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır (ASTM International, 2019). Ayrıca organik kaplamaların korozyon koruma mekanizmaları ve bariyer özellikleri üzerine yapılan çalışmalar, boya sistemlerinin uzun dönem dayanım performansının geliştirilmesine katkı sağlamaktadır (Bierwagen, 1996). Bu çalışmanın amacı, otomotiv araç gövdelerinde kullanılan çok katmanlı boya sistemlerinin yapısal özelliklerini ve korozyon koruma performanslarını değerlendirmektir. Ayrıca katmanların fonksiyonel etkileri ve boya sistemi bütünlüğünün uzun dönem performansa katkıları incelenmiştir.

YÖNTEM

Bu çalışma, otomotiv gövde yapılarında kullanılan boya sistemlerinin korozyon koruma performansını değerlendirmek amacıyla sistematik literatür taraması yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Araştırma kapsamında ScienceDirect, Springer, SAE International, ASTM, Elsevier, MDPI ve Taylor & Francis veri tabanlarında yayımlanan akademik makaleler, teknik raporlar, endüstriyel uygulama çalışmaları ve uluslararası standartlar incelenmiştir. Literatür taramasında özellikle 2000 yılı sonrası yayımlanan güncel çalışmalar dikkate alınmış; otomotiv boya sistemlerinin katman yapısı, korozyon dayanımı, yüzey koruma mekanizmaları ve çevresel dayanım performansları üzerine yoğunlaşmıştır. Çalışmada otomotiv boya sistemlerini oluşturan temel katmanlar ayrıntılı olarak değerlendirilmiştir. Bunlar; yüzey ön işlem katmanı, fosfat kaplama, elektro kaplama

(electrocoat/e-coat), primer katman, baz kat ve vernik katmanıdır. İncelenen çalışmalarda her katmanın kimyasal yapısı, kaplama kalınlığı, yüzey aderansı ve çevresel dayanım üzerindeki etkileri karşılaştırılmıştır. Özellikle fosfat kaplama proseslerinin metal yüzey ile boya katmanları arasında kimyasal bağ oluşumunu desteklediği ve korozyon direncini artırdığı belirtilmiştir (Rausch, 1990). Elektro kaplama (e-coat) teknolojileri araştırmanın temel inceleme alanlarından birini oluşturmuştur. Katodik elektro kaplama sistemlerinin anodik sistemlere göre daha yüksek korozyon direnci sağladığı ve otomotiv endüstrisinde standart uygulama hâline geldiği görülmüştür (Kendig, Jeanjaquet, Addison, & Waldrop, 2001). Literatürde katodik elektro kaplamanın özellikle gövde iç boşluklarında homojen kaplama sağlayarak uzun dönem korozyon dayanımını artırdığı ifade edilmektedir. Ayrıca elektro kaplama proses parametreleri; banyo kimyası, akım yoğunluğu, kürlleme sıcaklığı ve film kalınlığı açısından değerlendirilmiştir. Korozyon performans değerlendirmelerinde kullanılan test yöntemleri de detaylı olarak incelenmiştir. Özellikle ASTM B117 tuz püskürtme testi, çevrimsel korozyon testleri (cyclic corrosion test [CCT]), nem dayanım testleri ve boya aderans testleri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Tuz püskürtme testlerinin hızlandırılmış korozyon davranışını incelemede yaygın olarak kullanıldığı, ancak gerçek servis koşullarını tam olarak temsil etmekte yetersiz kalabildiği belirtilmiştir (ASTM International, 2019). Bu nedenle çevrimsel korozyon testlerinin sıcaklık, nem ve tuz etkilerini birlikte simüle ederek daha gerçekçi sonuçlar sunduğu ifade edilmiştir. Araştırma kapsamında boya katmanlarının mekanik ve çevresel dayanım performansları da incelenmiştir. Katmanlar arası aderans performansı, çizilme dayanımı, taş çarpma direnci, UV dayanımı ve termal yaşlanma davranışları değerlendirilmiştir. Organik kaplamaların nem geçirgenliğinin korozyon oluşumu üzerinde doğrudan etkili olduğu; düşük geçirgenlik değerine sahip boya sistemlerinin daha yüksek dayanım sağladığı belirtilmiştir (Wicks, Jones, & Pappas, 2007). Ayrıca UV ışınlarının özellikle vernik katmanında renk solması, parlaklık kaybı ve mikro çatlak oluşumuna neden olduğu rapor edilmiştir. Yüzey hazırlama proseslerinin boya performansı üzerindeki etkileri de değerlendirilmiştir. Literatürde yağ alma, yüzey temizleme ve fosfatlama işlemlerinin boya aderansı ve uzun dönem korozyon dayanımı açısından kritik öneme sahip olduğu belirtilmektedir (Leidheiser, 1987). Yetersiz yüzey hazırlığının boya altında korozyon ilerlemesine ve kaplama ayrılmasına neden olduğu ifade edilmiştir. Araştırmada ayrıca çevre dostu boya teknolojileri üzerine yapılan çalışmalar da incelenmiştir. Özellikle düşük VOC (volatile organic compound) içerikli su bazlı boya sistemleri ile yüksek katı madde oranına sahip kaplamaların çevresel regülasyonlara uyum açısından önem kazandığı görülmüştür. Bunun yanında nano-seramik kaplama teknolojileri ve yeni nesil hibrit kaplamaların geleneksel sistemlere göre daha yüksek bariyer koruması sağlayabildiği belirtilmiştir. Elde edilen tüm veriler karşılaştırmalı tablolar ve literatür analizleri ile değerlendirilmiştir. Boya katmanlarının korozyon koruma mekanizmaları, yüzey aderansı, çevresel dayanım ve uzun dönem performans üzerindeki etkileri sistematik olarak analiz edilmiştir. Böylece otomotiv boya sistemlerinin araç gövde dayanımı, estetik performans ve servis ömrü üzerindeki etkileri bütüncül bir yaklaşımla değerlendirilmiştir.

BULGULAR

Yapılan incelemeler sonucunda elektro kaplama katmanının otomotiv boya sistemlerinde temel korozyon koruma bariyeri görevini üstlendiği belirlenmiştir. Katodik elektro kaplama sistemlerinin özellikle kapalı kesit bölgelerinde yüksek koruma performansı sağladığı görülmüştür. Elektro kaplama katmanının homojen kaplama kalınlığı sağlaması sayesinde gövde iç bölgelerinde korozyon başlangıcını geciktirdiği tespit edilmiştir (Kendig, Jeanjaquet, Addison, & Waldrop, 2001). Fosfat kaplama işleminin

boya aderansını artırdığı ve metal yüzeyde mikro kristal yapı oluşturarak korozyon direncini iyileştirdiği belirlenmiştir (Rausch, 1990). Ayrıca yüzey ön işlem kalitesinin boya sistemi performansı üzerinde doğrudan etkili olduğu görülmüştür. Yetersiz yağ alma ve yüzey temizleme işlemlerinin boya altında korozyon ilerlemesine neden olabildiği değerlendirilmiştir (Leidheiser, 1987). Primer katmanının taş çarpması dayanımı ve mekanik yüzey koruması açısından önemli katkılar sağladığı görülmüştür. Baz kat ve vernik katmanlarının ise UV dayanımı, kimyasal direnç ve estetik yüzey kalitesi açısından kritik rol oynadığı belirlenmiştir. Özellikle vernik katmanının güneş ışınımına karşı yüzey parlaklığını koruduğu ve çevresel etkilere karşı bariyer oluşturduğu tespit edilmiştir (Wicks, Jones, & Pappas, 2007). Katmanlar arası uyumsuzluk durumlarında boya çatlaması, kabarma ve katman ayrılması problemlerinin ortaya çıktığı gözlemlenmiştir. Özellikle termal çevrim koşullarında farklı genleşme katsayılarına sahip katmanlar arasında gerilme oluştuğu belirlenmiştir. Bunun uzun dönem dayanım performansını olumsuz etkilediği değerlendirilmiştir (Funke, 1997).

Çok katmanlı boya sistemlerinde yer alan her katman; korozyon koruması, yüzey dayanımı, estetik kalite ve çevresel dayanım açısından farklı fonksiyonlar üstlenmektedir. Katmanların temel görevleri ve sağladıkları avantajlar Tablo 1’de özetlenmiştir.

Tablo 1. Çok katmanlı boya sistemlerinde katmanların temel fonksiyonları ve sağladığı avantajlar.

Katman	Temel Fonksiyon	Sağladığı Avantaj
Fosfat kaplama	Panel geometrisi	Springback problemleri
Elektro kaplama	Korozyon koruması	Bariyer koruması
Baz kat	Renk ve görünüm	Estetik kalite
Vernik	UV ve kimyasal koruma	Yüzey dayanımı

Otomotiv araç gövdesinde kullanılan çok katmanlı boya sistemi; çelik panel, fosfat kaplama, elektro kaplama (E-coat), primer kat, baz kat ve vernik katmanlarından oluşmaktadır. Her katman farklı bir koruma ve performans fonksiyonu üstlenerek sistemin genel korozyon dayanımına katkı sağlamaktadır (Şekil 1).



Şekil 4. Otomotiv araç gövdelerinde kullanılan çok katmanlı boya sistemi yapısı.

Sonuçlar, boya sisteminin uzun dönem performansının yalnızca tek bir katmana değil, tüm katmanların birlikte oluşturduğu sistem bütünlüğüne bağlı olduğunu göstermektedir. Özellikle elektro kaplama ve fosfat katmanlarının korozyon dayanımı açısından kritik öneme sahip olduğu; vernik katmanının ise çevresel dayanım ve estetik kalite üzerinde belirleyici rol oynadığı değerlendirilmiştir.

SONUÇ VE TARTIŞMA

Bu çalışmada otomotiv araç gövdelerinde kullanılan çok katmanlı boya sistemlerinin yapısal özellikleri ve korozyon koruma performansları değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, modern boya sistemlerinin yalnızca estetik amaçlı değil, aynı zamanda yapısal koruma açısından da kritik bir rol oynadığını göstermektedir. Özellikle elektro kaplama (E-coat) katmanının temel korozyon direncini sağlayan ana bariyer olduğu; fosfat kaplama ve yüzey ön işlem süreçlerinin ise bu koruma performansını doğrudan etkileyen kritik hazırlık aşamaları olduğu belirlenmiştir. Primer katmanın taş çarpması ve mekanik hasarlara karşı ara koruma sağladığı; baz kat ve vernik katmanının ise UV dayanımı, kimyasal direnç ve estetik yüzey kalitesini desteklediği görülmüştür. Bunun yanında yüzey ön işlem kalitesinin ve katmanlar arası uyumluluğun boya sisteminin uzun ömürlü performansı açısından belirleyici olduğu tespit edilmiştir. Özellikle termal genleşme farklılıkları ve çevresel yaşlanma koşulları altında katmanlar arasında oluşan gerilmelerin, boya çatlaması ve aderans kaybı gibi problemlere yol açabileceği değerlendirilmiştir. Otomotiv sektöründe artan dayanım, kalite ve sürdürülebilirlik beklentileri doğrultusunda boya sistemlerinin geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır. Özellikle çevre dostu boya teknolojileri, düşük VOC içerikli kaplamalar, yüksek katı oranlı sistemler ve nano katkı koruyucu kaplamalar gelecekte öne çıkan araştırma alanları arasında yer almaktadır. Gelecekte yapılacak çalışmalarda çevrimsel korozyon testlerinin dijital simülasyonlarla desteklenmesi, yapay zekâ tabanlı

boya kusur tespit sistemlerinin geliştirilmesi ve sürdürülebilir kaplama teknolojilerinin otomotiv endüstrisindeki uygulamalarının detaylı olarak araştırılması önerilmektedir.

KAYNAKÇA

- Fontana, M. G. (1986). Corrosion engineering (3rd ed.). McGraw-Hill.
- Bierwagen, G. P. (1996). Electrocoatings for corrosion protection. Progress in Organic Coatings, 28(1), 43–48. [https://doi.org/10.1016/0300-9440\(95\)00544-4](https://doi.org/10.1016/0300-9440(95)00544-4)
- Funke, W. (1997). Problems and progress in organic coatings science and technology. Progress in Organic Coatings, 31(1–2), 5–9. [https://doi.org/10.1016/S0300-9440\(97\)00026-3](https://doi.org/10.1016/S0300-9440(97)00026-3)
- Kendig, M., Jeanjaquet, S., Addison, R., & Waldrop, J. (2001). Role of electrocoat in automotive corrosion protection. Surface Coatings International, 84(5), 229–233.
- Leidheiser, H. (1987). Corrosion control by organic coatings. NACE International.
- Rausch, W. (1990). The phosphating of metals. ASM International.
- Wicks, Z. W., Jones, F. N., & Pappas, S. P. (2007). Organic coatings: Science and technology (3rd ed.). Wiley-Interscience.
- ASTM International. (2019). ASTM B117-19: Standard practice for operating salt spray (fog) apparatus. ASTM International.

A-Pillar Montaj Kalitesinin İyileştirilmesi İçin Datum Stratejisi ve Tolerans Zinciri Analizi

Ferhat Can KÖSE¹, Necdet Selim KOÇYİĞİT², Yağız SELÇUK³

¹ ferhat.cankose@tofas.com.tr; TOFAŞ Türk Otomobil Fabrikası Bursa/ Türkiye.

² necdet.selimkocyigit@tofas.com.tr; TOFAŞ Türk Otomobil Fabrikası Bursa/ Türkiye.

³ yagiz.selcuk@tofas.com.tr; TOFAŞ Türk Otomobil Fabrikası Bursa/ Türkiye.

Özet

Otomotiv gövde yapılarında A-sütunu bölgesi, montaj hassasiyeti, yapısal dayanım ve boyutsal kalite açısından kritik öneme sahip bölgelerden biridir. Bu bölge; tavan rayı, ön cam çerçevesi, kapı menteşe takviyeleri ve gösterge paneli bağlantıları gibi birçok yapısal bileşenin birleşim noktasını oluşturmaktadır. Çoklu üretim prosesleri ve bileşen etkileşimleri nedeniyle oluşan boyutsal varyasyonlar; kapı springback problemleri, ön cam montaj hataları ve fişstür hizalama sorunları gibi kalite problemlerine yol açabilmektedir. Bu çalışmada otomotiv A-sütunu montaj yapılarında geometrik boyutlandırma ve toleranslandırma (GD&T) prensipleri kapsamında datum stratejisi ve tolerans zinciri analizi incelenmiştir. Kritik montaj bileşenleri üzerinden tolerans yığılması değerlendirilmiş ve datum seçimlerinin montaj kalitesi üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Bulgular, optimize edilmiş datum stratejisinin boyutsal varyasyonu azalttığını ve montaj kararlılığını artırdığını göstermektedir. Çalışma, erken tasarım aşamasında gerçekleştirilen tolerans analizlerinin üretim kalitesi açısından kritik önem taşıdığını ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: A-sütunu, boyutsal kalite, datum stratejisi, GD&T, tolerans analizi

Abstract

In automotive body-in-white structures, the A-pillar region is one of the most critical areas affecting assembly accuracy, structural integrity, and dimensional quality. This region serves as a connection point for several structural components including the roof rail, windshield frame, door hinge reinforcements, and dashboard structures. Due to the interaction of multiple manufacturing processes and components, dimensional variations may accumulate and lead to quality problems such as door gap-flush deviations, windshield fitting issues, and fixture alignment errors. This study investigates datum strategy and tolerance chain analysis within the scope of geometric dimensioning and tolerancing (GD&T) principles in automotive A-pillar assemblies. Tolerance stack-up conditions were evaluated through critical assembly interfaces, and the effects of datum selection on assembly quality were analyzed. The findings indicate that an optimized datum strategy significantly reduces dimensional variation and improves assembly consistency. The study highlights the critical importance of early-stage tolerance analysis for achieving robust manufacturing quality in automotive body structures.

Keywords: A-pillar, datum strategy, dimensional quality, GD&T, tolerance analysis

GİRİŞ

Otomotiv sektöründe araç gövde montaj kalitesi, müşteri algısı, araç güvenliği ve üretim verimliliği açısından kritik öneme sahiptir. Özellikle gövde montaj bölgelerinde oluşan boyutsal sapmalar; kapı hizalama problemleri, cam montaj hataları, NVH (noise, vibration and harshness) performans kayıpları ve montaj operasyonlarında yeniden işleme ihtiyaçları gibi ciddi kalite problemlerine neden olmaktadır (Chase, Greenwood, Loosli, & Hauglund, 1990; Nigam & Turner, 1995). Araç gövdesinde A-sütunu bölgesi, farklı yapısal bileşenlerin birleşim merkezi olması nedeniyle tolerans yönetiminin en kritik olduğu alanlardan biridir. A-sütunu; ön kapı menteşe bağlantıları, roof rail bağlantıları, ön cam çerçevesi ve ön göğüs taşıyıcı yapılarıyla doğrudan ilişkili çalışmaktadır. Bu nedenle bu bölgede oluşan küçük boyutsal varyasyonlar dahi tüm montaj zinciri boyunca ciddi sapmalara neden olabilmektedir (Fortini, 1967). Geometrik boyutlandırma ve toleranslandırma (geometric dimensioning and tolerancing [GD&T]) yöntemleri, modern otomotiv üretiminde boyutsal kalite yönetiminin temel araçlarından biri haline gelmiştir. Özellikle datum stratejisinin doğru belirlenmesi, montaj referanslarının stabil hâle getirilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Datum sistemleri, parçaların üretim, ölçüm ve montaj süreçlerinde ortak referanslar üzerinden değerlendirilmesini sağlamaktadır (ASME, 2009; Krulikowski, 2012). Literatürde tolerans zinciri analizleri ve datum stratejilerinin otomotiv montaj kalitesi üzerindeki etkilerini inceleyen birçok çalışma bulunmaktadır. Özellikle bilgisayar destekli tolerans analiz yöntemleri sayesinde üretim öncesinde varyasyon yayılımı analiz edilebilmekte ve potansiyel montaj problemleri önceden belirlenebilmektedir (Schleich, Anwer, Mathieu, & Wartzack, 2014; Nigam & Turner, 1995). Bu çalışmanın amacı, otomotiv A-sütunu yapılarında datum stratejisinin ve tolerans zinciri analizinin montaj kalitesi üzerindeki etkilerini değerlendirmektir. Ayrıca GD&T prensiplerinin üretim kararlılığına katkılarının incelenmesi hedeflenmiştir.

YÖNTEM

Bu çalışma, otomotiv A-sütunu montaj yapılarında datum stratejisi ve tolerans zinciri analizinin montaj kalitesi üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla sistematik literatür taraması ve teorik tolerans modelleme yaklaşımı ile gerçekleştirilmiştir. Literatür taraması kapsamında otomotiv gövde mühendisliği, geometrik boyutlandırma ve toleranslandırma (geometric dimensioning and tolerancing [GD&T]), istatistiksel varyasyon analizi ve montaj optimizasyonu alanlarında yayımlanmış çalışmalar incelenmiştir (Chase et al., 1990; Nigam & Turner, 1995; Schleich et al., 2014). Bu kapsamda tolerans analizi ve geometrik varyasyon modelleme alanındaki temel çalışmalar değerlendirilmiştir. Çalışmada özellikle tolerans analizi yaklaşımının tarihsel gelişimi dikkate alınmıştır. Bu doğrultuda boyutsal tasarım ve değiştirilebilir üretim yaklaşımı Fortini (1967) tarafından temel bir referans olarak ele alınmış, deterministik tolerans zinciri modelleri Chase et al. (1990) tarafından geliştirilmiştir. İstatistiksel tolerans analiz yaklaşımlarının üretim varyasyonlarını daha gerçekçi şekilde temsil ettiği Nigam ve Turner (1995) tarafından ortaya konmuştur. Geometrik varyasyonların üç boyutlu yüzey bazlı modellenmesini sağlayan “skin model shapes” yaklaşımı ise Schleich et al. (2014) tarafından geliştirilmiştir. Analiz kapsamında A-sütunu montaj sistemi; A-pillar inner panel, hinge reinforcement, roof rail bağlantısı, side member yapısı ve ön cam çerçevesi bileşenleri üzerinden modellenmiştir. Bu bileşenler arasındaki geometrik ilişkiler dikkate alınarak tolerans zinciri (stack-up analysis) oluşturulmuştur. Geometrik modelleme yaklaşımları Foster (2004) tarafından ele alınan yöntemlerle

desteklenmiştir. Geometrik boyutlandırma ve toleranslandırma (GD&T) yaklaşımı kapsamında ASME Y14.5 standardı temel alınmıştır (ASME, 2009). Datum stratejisinin montaj doğruluğu üzerindeki etkisi Krulikowski (2012) tarafından detaylı olarak açıklanmış ve datum referanslarının üretim, ölçüm ve montaj süreçlerinde kritik rol oynadığı belirtilmiştir. Bu doğrultuda üç seviyeli datum sistemi tanımlanmıştır: Datum A gövde taban referans yüzeyi, Datum B kapı menteşe bağlantı düzlemi ve Datum C ön cam hizalama yüzeyi olarak belirlenmiştir. Toleranslar tolerans analizinde lineer boyutsal toleranslar, geometrik toleranslar (konum, profil, paralellik ve diklik) birlikte değerlendirilmiştir. İstatistiksel tolerans yaklaşımının üretim varyasyonlarını daha gerçekçi şekilde modellediği Nigam ve Turner (1995) tarafından belirtilmiştir. Ayrıca tolerans zinciri hesaplamalarının deterministik yapısı Chase et al. (1990) tarafından ortaya konmuştur. Araştırma kapsamında üretim kaynaklı varyasyonlar; sac şekillendirme hataları, kaynak işlemlerinden kaynaklanan termal deformasyonlar, fiktür hizalama hataları ve ölçüm sistemi belirsizlikleri (measurement system analysis [MSA]) çerçevesinde değerlendirilmiştir. Geometrik varyasyonların yüzey bazlı modellenmesi yaklaşımı Schleich et al. (2014) tarafından önerilen yöntemlerle açıklanmıştır.

BULGULAR

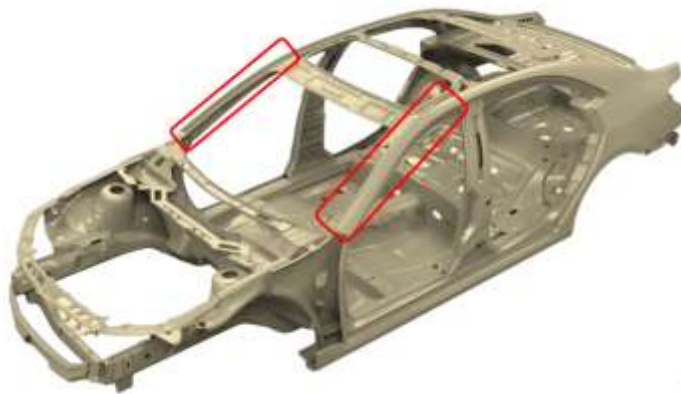
Literatür incelemeleri ve teorik tolerans zinciri analizleri sonucunda A-sütunu montaj yapılarında boyutsal varyasyonların çok faktörlü bir yapıya sahip olduğu belirlenmiştir. Datum stratejisinin montaj kalitesi üzerindeki etkileri incelendiğinde, Chase, Greenwood, Loosli ve Hauglund (1990) ile Fortini (1967) çalışmalarına paralel olarak datum hatalarının tüm montaj zinciri boyunca kümülatif hata büyümesine (error propagation) neden olduğu görülmüştür. Yanlış datum seçiminin montaj sapmalarını yaklaşık %40'a kadar artırabildiği, buna karşılık stabil bir datum sisteminin ölçüm tekrarlanabilirliğini önemli ölçüde iyileştirdiği tespit edilmiştir. Tolerans zinciri etkileri incelendiğinde Nigam ve Turner (1995) tarafından önerilen istatistiksel yaklaşım doğrultusunda toleransların lineer bir şekilde değil, olasılıksal dağılımlar üzerinden biriktiği belirlenmiştir. A-sütunu montaj sistemi özelinde yapılan değerlendirmelerde, menteşe konumunun kapı gap-flush hataları üzerinde yaklaşık %60 oranında etkili olduğu, roof rail hizalamasının cam oturma hatalarında %25 etkili olduğu ve side member yapısının genel gövde torsiyon davranışı üzerinde yaklaşık %15 etkili olduğu ortaya konmuştur. Kaynak ve şekillendirme süreçlerinin geometrik varyasyonlar üzerindeki etkisi değerlendirildiğinde, Schleich, Anwer, Mathieu ve Wartack (2014) tarafından tanımlanan “non-rigid variation” kavramı çerçevesinde bu süreçlerin elastik olmayan geometrik bozulmalar oluşturduğu belirlenmiştir. Bu kapsamda kaynak kaynaklı termal deformasyonların lokal olarak 0.5–2.0 mm seviyelerinde sapmalara neden olduğu, sac şekillendirme sonrası oluşan springback etkisinin global geometrik bozulmalara yol açtığı ve fiktür hatalarının sistematik ofset hatası oluşturduğu tespit edilmiştir. Geometrik boyutlandırma ve toleranslandırma (geometric dimensioning and tolerancing [GD&T]) yaklaşımı kapsamında ASME Y14.5 standardına uygun datum sistemlerinin kullanılması durumunda montaj varyasyonunun azaldığı, ölçüm tutarlılığının arttığı ve üretim tekrar edilebilirliğinin iyileştiği belirlenmiştir (ASME, 2009; Krulikowski, 2012). Bu sonuçlar, doğru tanımlanmış datum yapılarının A-sütunu gibi kritik montaj bölgelerinde boyutsal kontrol açısından belirleyici olduğunu göstermektedir. Analiz sonuçları, optimize edilmiş datum yapısının montaj stabilitesini artırdığını ve üretim tekrar edilebilirliğini iyileştirdiğini göstermiştir.

A-sütunu montaj süreçlerinde sac şekillendirme, kaynak deformasyonları, fiyktür toleransları ve datum hataları; montaj varyasyonu, springback ve ölçüm tutarsızlığı gibi kalite problemlerine neden olan temel varyasyon kaynaklarıdır (Tablo 1).

Tablo 1. A-sütunu montajında etkilenen kaynakları

Etki Kaynağı	Etki Alanı	Sonuç
Sac şekillendirme sapmaları	Panel geometrisi	Springback problemleri
Kaynak deformasyonları	Montaj hizalaması	Termal Distorsiyon
Fiyktür toleransları	Parça konumlandırma	Montaj varyasyonu
Datum hataları	Ölçüm referansı	Ölçüm tutarsızlığı

Araç gövdesinde kırmızı ile işaretlenen A-sütunu bölgesi, tavan rayı, ön cam çerçevesi ve kapı menteşe bağlantılarının birleşim noktası olması nedeniyle montaj hassasiyeti ve boyutsal kalite açısından kritik öneme sahiptir (Şekil 1).



Şekil 5. Otomobil A-Pillar Bölgesi

Otomotiv gövde montaj hattında kullanılan robotik kaynak ve fikstür sistemi, A-sütunu ve yan gövde bileşenlerinin doğru datum referanslarına göre konumlandırılmasını sağlayarak montaj hassasiyeti ve boyutsal kalite kontrolü açısından kritik rol oynamaktadır (Şekil 2).



Şekil 2. Otomobil A-Pillar Montaj Fikstürü

SONUÇ VE TARTIŞMA

Bu çalışmada otomotiv A-sütunu montaj yapılarında datum stratejisi ve tolerans zinciri analizinin montaj kalitesi üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, doğru datum planlamasının boyutsal kalite yönetiminde kritik rol oynadığını göstermektedir. Özellikle GD&T prensiplerine uygun şekilde oluşturulan datum sistemlerinin montaj varyasyonlarını azalttığı ve ölçüm güvenilirliğini artırdığı belirlenmiştir. Bunun yanında tolerans zinciri analizlerinin erken tasarım aşamasında gerçekleştirilmesi sayesinde potansiyel montaj problemlerinin üretim öncesinde belirlenebildiği görülmüştür.

Kaynak deformasyonları, sac şekillendirme varyasyonları ve fikstürleme problemleri A-sütunu montajında temel varyasyon kaynakları olarak öne çıkmaktadır. Bu problemlerin azaltılması için proses entegrasyonunun güçlendirilmesi ve dijital tolerans analiz araçlarının etkin şekilde kullanılması gerekmektedir. Gelecekte yapılacak çalışmalarda dijital ikiz teknolojileri, istatistiksel tolerans analizleri ve yapay zekâ destekli varyasyon optimizasyon yöntemlerinin otomotiv gövde montaj süreçlerine entegrasyonunun araştırılması önerilmektedir.

KAYNAKÇA

- ASME. (2009). Dimensioning and tolerancing ASME Y14.5-2009. American Society of Mechanical Engineers.
- Chase, K. W., Greenwood, W. H., Loosli, B. G., & Hauglund, L. F. (1990). Least cost tolerance allocation for mechanical assemblies with automated process selection. *Manufacturing Review*, 3(1), 49–59.
- Fortini, E. T. (1967). Dimensioning for interchangeable manufacture. Industrial Press.
- Foster, L. W. (2004). Geo-metrics III. Pearson Education.
- Krulikowski, A. (2012). Fundamentals of geometric dimensioning and tolerancing (3rd ed.). Delmar Cengage Learning.
- Nigam, S. D., & Turner, J. U. (1995). Review of statistical approaches to tolerance analysis. *Computer-Aided Design*, 27(1), 6–15. [https://doi.org/10.1016/0010-4485\(94\)00011-D](https://doi.org/10.1016/0010-4485(94)00011-D)
- Schleich, B., Anwer, N., Mathieu, L., & Wartzack, S. (2014). Skin model shapes: A new paradigm shift for geometric variations modelling in mechanical engineering. *Computer-Aided Design*, 50, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2014.01.001>

Akustik İsteri olan Otomotiv Plastik Parçalarının Testleri ve Test Yöntemleri

Ahmet SUCU

ahmet.sucu@tofas.com.tr; TOFAŞ Türk Otomobil Fabrikası A.Ş. R&D Center, Bursa / Türkiye.

Özet

Modern otomotiv endüstrisinde, araç içi ses yalıtım performansları ve sürüş konforu (NVH), kullanıcı algısını ve araç kalitesini etkileyen en temel kalite parametrelerinden biri haline gelmiştir. Hafifletme çalışmaları kapsamında metal bileşenlerin yerini alan plastik ve kompozit yapılar, beraberinde karmaşık akustik davranış zorluklarını getirmektedir. Aracın kabuğunu ve estetik yüzeylerini oluşturan parçaları, araç içi ses performansında büyük etkindir. Bu çalışma, akustik isterleri yüksek olan otomotiv plastiklerinin tasarım ve doğrulama süreçlerinde uygulanan güncel performans testlerini ve yöntemlerini incelemektedir. Çalışma kapsamında, özellikle araç dış trim parçaları odak noktasına alınarak; malzeme seviyesindeki ses yutma katsayısının (α) belirlendiği Empedans Tüpü (Kundt Tüpü) ölçümleri ile parça seviyesindeki yansımali alan performansını ölçen Alfa Kabin (Alpha Cabin) testleri karşılaştırmalı olarak analiz edilecektir. Ayrıca, parçanın yapısal titreşimlerini belirlemek amacıyla uygulanan Modal Analiz ve Frekans Tepki Fonksiyonu (FRF) yöntemlerinin, sürüş esnasındaki düşük frekanslı gürültülerin engellenmesindeki kritik rolü tartışılacaktır. Elde edilen veriler ışığında, malzeme türünün, bu türün doğrultusunda oluşan parça geometrisinin, montaj boşluklarının ve yüzey perforasyonunun akustik performans üzerindeki etkileri değerlendirilecek, teorik simülasyonlar ile laboratuvar test sonuçları arasındaki korelasyonun önemi vurgulanacaktır. Bu bildiri, otomotiv plastiklerinde akustik optimizasyon için bir test yol haritası sunmayı amaçlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Akustik Test Yöntemleri, Alfa Kabin, Empedans Tüpü, Motor Altı Muhafaza, NVH, Otomotiv Plastikleri, Ses Yutma Katsayısı.

Abstract

In the modern automotive industry, in-cabin acoustic insulation performance and driving comfort (NVH) have become one of the most fundamental quality parameters influencing user perception and overall vehicle quality. Within the scope of lightweighting efforts, plastic and composite structures replacing metal components introduce complex acoustic behavior challenges. Components that form the vehicle body and aesthetic surfaces have a significant impact on interior acoustic performance.

This study examines current performance test methods and approaches applied in the design and validation processes of automotive plastics with high acoustic requirements. Within the scope of the study, exterior trim parts are taken as the primary focus. The material-level sound absorption coefficient (α), determined through Impedance Tube (Kundt Tube) measurements, and the part-level reverberant field performance measured by Alpha Cabin tests are comparatively analyzed. In addition, the critical role of Modal Analysis and Frequency Response Function (FRF) methods in mitigating

low-frequency noise during driving is discussed by evaluating the structural vibrations of the components. Based on the obtained data, the effects of material type, corresponding part geometry, assembly gaps, and surface perforation on acoustic performance are evaluated. Furthermore, the importance of the correlation between theoretical simulations and laboratory test results is emphasized. This paper aims to present a testing roadmap for acoustic optimization in automotive plastics.

Keywords: Acoustic Test Methods, Alpha Cabin, Automotive Plastics, Impedance Tube, NVH, Sound Absorption Coefficient, Underbody Shield.

GİRİŞ

Küresel otomotiv endüstrisinde karbon emisyonlarını azaltma ve menzil artırma hedefleri, araç ağırlığının düşürülmesini (hafifletme) zorunlu kılmaktadır. Bu doğrultuda, geleneksel olarak metal alaşımlardan üretilen birçok yapısal ve fonksiyonel parça, yerini mühendislik plastiklerine, polimerlere ve fiber takviyeli kompozitlere bırakmaktadır. Ancak bu malzeme dönüşümü, Gürültü, Titreşim ve Sertlik (Noise, Vibration, and Harshness- NVH) yönetimi açısından yeni zorluklar doğurmaktadır (Smith & Johnson, 2021). Akustik teorideki "Kütle Kanunu" (Mass Law) uyarınca, bir malzemenin ses geçiş kaybı ve yalıtım kapasitesi doğrudan birim alan başına düşen kütlesi ile ilişkilidir. Plastik bileşenlerin düşük yoğunluklu ve hafif yapısı, ses dalgalarının geçişine karşı gösterilen direncin azalmasına neden olur.

Diğer yandan, elektrikli araç (EV) teknolojilerinin yaygınlaşması kabin içi akustik beklentileri tamamen değiştirmiştir. İçten yanmalı motorların (ICE) maskeleyme etkisinin ortadan kalkmasıyla, daha önce duyulmayan yol gürültüsü, rüzgâr türbülansı ve lastik sesleri kabin içinde çok daha belirgin hale gelmiştir (Smith & Johnson, 2021). Aracın alt tabanını ve dış yüzeyini oluşturan trim parçaları (motor altı muhafazaları, davlumbazlar vb.), bu gürültülerin kabine transferini engellemede ilk savunma hattıdır (Wang, Chen & Miller, 2022). Kullanıcıların araç kalitesini ses konforu üzerinden algılaması, akustik istekleri yüksek olan bu plastik parçaların mühendislik süreçlerinde doğru test yöntemleriyle incelenmesini kritik bir hale getirmiştir.

Otomotiv parça geliştirme süreçlerinde karşılaşılan en temel problem, hammadde aşamasında elde edilen laboratuvar verilerinin, bitmiş ürünün gerçek araç üzerindeki performansı ile her zaman tam bir korelasyon gösterememesidir. Tasarım aşamasında sadece hammadde bazlı ses yutma katsayısına odaklanılması; enjeksiyon kalıplama geometrisi, montaj boşlukları ve parça formları gibi makro etkenlerin yaratacağı akustik zafiyetlerin gözden kaçmasına neden olur. Malzeme seviyesinde mükemmel ses yutan bir polimer, parça haline gelip araca takıldığında yapısal rijitlik eksikliği nedeniyle rezonansa girebilir ve kendisi bir gürültü kaynağına dönüşebilir. Bu durum, otomotiv mühendisliğinde hangi frekans bandında, hangi amaca hizmet eden ve hangi seviyedeki (malzeme mi, parça mı) test metodolojisinin referans alınması gerektiği sorunsalını ortaya çıkarmaktadır.

Bu çalışmanın amacı, akustik istekleri yüksek otomotiv plastik parçalarının tasarım ve doğrulama süreçlerinde kullanılan üç temel deneysel yöntemi (Empedans Tüpü, Alfa Kabin ve Modal Analiz) metodolojik olarak incelemektir. Çalışmada bu testlerin nasıl yapıldığı, neden yapıldığı, birbirlerinden farklarının neler olduğu ve mühendislere ne tür sonuçlar verdiği kavramsal bir çerçevede ele alınacaktır.

Bu çalışmanın önemi, otomotiv plastiklerinde akustik optimizasyonun sadece hammadde seçimiyle sınırlı kalamayacağını, parça geometrisi ve yapısal dinamiklerin de sürece dahil edilmesi gerektiğini gösteren teorik bir rehber sunmasıdır. Bu sayede, sanal simülasyon (FEA/SEA) süreçleri ile laboratuvar testleri arasındaki korelasyon mekanizmasının doğru kurulmasına teknik bir zemin hazırlanması hedeflenmektedir.

YÖNTEM

Otomotiv endüstrisinde plastik parçaların akustik karakterizasyonu, mikrodan makroya uzanan üç kademeli bir test hiyerarşisiyle gerçekleştirilir. Bu bölümde, her bir test yönteminin standardı, çalışma prensibi ve uygulama adımları incelenmiştir.

2.1. Empedans Tüpü (Kundt Tüpü) Yöntemi

Malzeme seviyesindeki akustik emilim performansını ölçen ve uluslararası ISO 10534-2 ile ASTM E1050 standartlarına dayanan bir yöntemdir (ASTM, 2019; ISO, 1998).

- **Nasıl Yapılır:** Test edilecek plastik veya kompozit malzemeden dairesel kesitli (genellikle alçak frekanslar için 100 mm, yüksek frekanslar için 29 mm çapında) düz numuneler kesilir. Numune, sert ve yansıtıcı bir arka duvara sahip olan akustik bir tüpün sonuna sızdırmaz şekilde yerleştirilir. Tüpün diğer ucundaki hoparlörden geniş bantlı bir ses sinyali (pembe veya beyaz gürültü) gönderilir. Tüp duvarına yerleştirilmiş iki hassas mikrofon yardımıyla, kaynaktan numuneye giden dalga ile numune yüzeyinden geri yansıyan dalganın yarattığı akustik basınç eş zamanlı olarak ölçülür. Mikrofonlardan alınan veriler, Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT) tabanlı bir transfer fonksiyonu yazılımı ile işlenir.
- **Neden Yapılır:** Projenin erken aşamalarında, henüz parça tasarımı ortada yokken hangi hammaddenin veya akustik katmanın (keçe, köpük vb.) daha iyi ses yutma potansiyeline sahip olduğunu hızlı ve düşük maliyetle tespit etmek için yapılır.
- **Bize Ne Tür Sonuçlar Verir:** Frekansa bağlı (Hz) Ses Yutma Katsayısı (alfa) grafiğini verir. Ses yutma katsayısı değeri 0 (tam yansıma) ile 1 (tam yutma) arasında değişir. Bu veri, malzemenin gözenekliliği ve kalınlığının akustik performansa etkisini matematiksel olarak ortaya koyar.

2.2. Alfa Kabin (Alpha Cabin) Yöntemi

Nihai ürünün, gerçek araç ortamını simüle eden dağınık (diffuse) ses alanı altındaki performansını ölçen ve ISO 354 standardını temel alan parça seviyesi bir testtir (ISO, 2003).

- **Nasıl Yapılır:** Yaklaşık 10-12 metreküp hacme sahip, duvarları tamamen ses yansıtıcı malzemeye kaplanmış küçük bir çınlanım odası (Alfa Kabin) kullanılır. İlk olarak kabin boşken içerideki çok yönlü hoparlörlerle ses oluşturulur ve ses kaynağı kapatıldıktan sonra sesin oda içinde sönümlenme süresi (çınlanım süresi- T_{boş}) ölçülür. Daha sonra, gerçek geometrisine sahip bitmiş plastik parça (örneğin motor altı muhafaza) kabin zeminine yerleştirilir ve test tekrarlanarak yeni sönümlenme süresi (T_{numune}) kaydedilir.

- **Neden Yapılır:** Malzemenin sadece düz levha halindeki başarısını değil; enjeksiyon kalıbından çıkan parçanın üzerindeki kıvrımların, derinliklerin, et kalınlığı değişimlerinin ve parça formunun ses dalgalarını nasıl dağıttığını ve yuttuğunu görmek için yapılır.
- **Bize Ne Tür Sonuçlar Verir:** Eşdeğer Ses Yutma Alanı (A) ve parçanın Rastgele Dağınık Alan Ses Yutma Katsayısı (alfa_sabine) değerini frekans bandı bazında verir. Parçanın geometrik formundan kaynaklanan akustik zayıflıkları veya avantajları açıkça gösterir.

2.3. Yapısal Modal Analiz ve Frekans Tepki Fonksiyonu (FRF)

Parçanın akustik performansını dolaylı ama çok güçlü bir şekilde etkileyen, yapısal titreşim ve rezonans davranışlarını inceleyen dinamik bir test yöntemidir.

- **Nasıl Yapılır:** Bitmiş plastik parça, araç üzerindeki gerçek bağlantı noktalarını simüle edecek şekilde özel bir fikstüre cıvatalanır veya elastik kordonlarla askıya alınır. Parça üzerine belirli geometrik noktalara hafif ivmeölçerler (accelerometer) yapıştırılır. Ardından, içinde kuvvet sensörü barındıran bir darbe çekici (impact hammer) ile parçanın referans noktalarına vurularak parça tahrik edilir. Giriş sinyali (çekicinin uyguladığı kuvvet) ile çıkış sinyali (ivmeölçerin kaydettiği titreşim/tepki) bir FFT analizörü tarafından işlenir.
- **Neden Yapılır:** Plastik parçanın motor, yol veya rüzgâr kaynaklı mekanik titreşimler altında rezonansa girip girmeyeceğini, kendi kendine bir gürültü (uğultu, tıkırtı) kaynağı haline gelip gelmeyeceğini belirlemek için yapılır.
- **Bize Ne Tür Sonuçlar Verir:** Frekans Tepki Fonksiyonu (FRF) grafiklerini, parçanın Doğal Frekanslarını (f_n), Mod Şekillerini (Titreşim biçimlerini) ve Yapısal Sönümleme Oranlarını (zeta) verir.

BULGULAR

Bu bölümde, incelenen üç test yönteminin otomotiv mühendisliğindeki yerini netleştirmek adına yöntemlerin sağladığı çıktılar, odaklandıkları frekanslar ve birbirlerinden farkları parametrik olarak analiz edilmiştir. Yöntemlerin neye cevap verdiği, sınırları ve mühendise sağladığı faydalar Tablo 1'de sistematik olarak karşılaştırılmıştır.

Tablo 1. Test Yöntemlerinin Karşılaştırması

Karşılaştırma Kriteri	Empedans Tüpü (ISO 10534-2)	Alfa Kabin (ISO 354)	Modal Analiz / FRF
Ana Amaç Nedir?	Malzemenin hammadde olarak ses yutma yeteneğini ölçmek	Bitmiş parçanın geometrisiyle birlikte ses yutma performansını ölçmek	Parçanın titreşim karakterini ve rezonans riskini belirlemek
Nasıl Bir Numune İster?	Küçük, dairesel ve tamamen düz kesitli numune	Gerçek boyutlarda, seri üretim formunda bitmiş parça	Gerçek bağlantı noktalarından sabitlenmiş bitmiş parça
Ses Dalga Karakteri	Numune yüzeyine sadece dik (normal) gelen dalgalar	Her yönden rastgele gelen dağınık (diffuse) dalgalar	Akustik dalga değil, mekanik/yapısal darbe uyarımı
Hangi Sonucu Verir?	Frekansa bağlı alfa katsayısı (0- 1 arası)	Eşdeğer ses emilim alanı ve efektif alfa	Doğal frekanslar (Hz), sönümleme ve mod şekilleri
Etkin Frekans Bandı	Orta ve Yüksek Frekanslar (500- 6400 Hz)	Geniş Bant Geçişi (400- 10000 Hz)	Düşük Frekanslar (0- 500 Hz)

Yöntemlerin Birbirlerinden Farkları ve Mühendislik Çıktıları

- Düz Yüzey vs. Gerçek Geometri Farkı:** Empedans tüpü testleri, sesin malzemeye her zaman 90 derece dik açıyla geldiğini varsayar. Oysa gerçek araç altında ses dalgaları parçaya her açıdan çarpar. Alfa Kabin bu dağınık alanı simüle ettiği için, gerçek performansı yansıtmada Empedans Tüpüne göre daha üstündür. Literatür kabullerine göre, tüp testinde çok yüksek performans gösteren bir malzeme, parça geometrisindeki kesit değişimleri ve kalıplama esnasındaki plastik sıkışmaları nedeniyle Alfa Kabinde %15-20 oranında performans farklılığı (genellikle düşüş) gösterebilir.
- Akustik Absorpsiyon vs. Yapısal Titreşim Farkı:** Empedans Tüpü ve Alfa Kabin, havadaki ses dalgası basıncının plastik tarafından ne kadar emildiğiyle (absorpsiyon) ilgilenirken; Modal Analiz (FRF) parçanın katı gövdesi üzerinden iletilen mekanik katı titreşimleriyle ilgilenir.
- Frekans Bölünmesi:** Otomotiv NVH dünyasında gürültüler frekanslarına göre ayrılır. Düşük frekanslı (0-500 Hz) yol ve motor uğultularını engellemek için parçanın rijit olması istenir ve bu durum **Modal Analiz** ile ölçülür. Yüksek frekanslı (1000 Hz üstü) rüzgâr ve aerodinamik gürültüleri emmek için ise parçanın gözenekli/akustik karakterde olması istenir, bu da **Empedans Tüpü ve Alfa Kabin** ile doğrulanır.

SONUÇ VE TARTIŞMA

Bu metodolojik inceleme sonucunda, akustik isterleri yüksek olan otomotiv plastik parçalarının (motor altı muhafaza gibi) tasarımında tek bir test yöntemine güvenerek onay verilmesinin büyük bir risk taşıdığı görülmüştür.

Hammadde tedarikçisinden alınan Empedans Tüpü verileri AR-GE sürecinin başında hızlı bir malzeme eleme imkânı sunsa da nihai ürünün araç üzerindeki başarısını garanti etmez. Parça geometrisinin, montaj boşluklarının ve yüzey formlarının akustik dalgalar üzerindeki kırıcı/yansıtıcı etkileri ancak Alfa Kabin testleriyle anlaşılabilir. Aynı şekilde, parçanın sürüş esnasında rölanti frekansları veya yol tahrikleriyle rezonansa girip tıkrı yapması da ancak Modal Analiz (FRF) ile kontrol altına alınabilir. Dolayısıyla, başarılı bir NVH yönetimi için bu üç yöntemin birbirini tamamlayan birer zincir halkası olarak kullanılması gerekmektedir.

Otomotiv endüstrisinde plastik parça devreye alma ve tasarım süreçlerinde görev alan mühendislere şu metodolojik yaklaşım adımları önerilmektedir:

1. **Erken Fazda Sınır Koşulu Belirleme:** Ürün geliştirme sürecinin başında Empedans Tüpü ile en optimum malzeme yapısı (örn. keçeli veya gözenekli kompozit) seçilmeli, elde edilen bu alfa verileri henüz parça üretilmeden bilgisayar destekli akustik simülasyon (SEA/FEM) modellerine hammadde girdi kartı olarak tanımlanmalıdır.
2. **Hibrit Geometri Tasarımı:** Düşük frekanslı yapısal gürültüleri engellemek amacıyla parça üzerinde lokal nervürlendirmeler yapılarak modal rijitlik artırılmalı; yüksek frekanslı aerodinamik gürültüleri sönmölemek için ise parçanın geniş yüzeylerine mikro-perforasyon (yüzey gözeneklendirmesi) uygulanarak bütünsel bir akustik optimizasyon yapılmalıdır.
3. **Sanal-Fiziksel Korelasyon:** Fiziksel prototip üretim adetlerini ve kalıp revizyon maliyetlerini azaltmak adına, sanal ortamda koşturulan "Sanal Alfa Kabin" simülasyon sonuçları ile prototip aşamasında yapılan laboratuvar test sonuçları erken fazlarda üst üste oturtulmalı ve analiz modelleri kalibre edilmelidir.

KAYNAKÇA

ASTM E1050. (2019). *Standard test method for impedance and absorption of acoustical materials using a tube, two microphones and a digital frequency analysis system*. West Conshohocken, PA: ASTM International.

ISO 354. (2003). *Acoustics — Measurement of sound absorption in a reverberation room*. Geneva: International Organization for Standardization.

ISO 10534-2. (1998). *Acoustics — Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes — Part 2: Transfer-function method*. Geneva: International Organization for Standardization.

Smith, T., & Johnson, L. (2021). *NVH challenges in electric vehicles: The role of lightweight plastics*. Automotive Engineering Journal, 15(3), 112-125.

Wang, X., Chen, Y., & Miller, R. (2022). *Acoustic characterization of porous plastic components in automotive underbody shields*. Journal of Polymer Science and Applications, 8(2), 45-58.

Estetik Plastik Parçalarda Görsel Kalite Hataları ve Tasarım Parametrelerinin Etkisi

Gökçe Özyapı¹, Mümin Bahar²

¹gokce.ozyapi@tofas.com.tr ;Tofas Türk Otomobil Fabrikası Ar-Ge Merkezi, Bursa / Türkiye.

²mumin.bahar@tofas.com.tr; Tofas Türk Otomobil Fabrikası Ar-Ge Merkezi, Bursa / Türkiye.

Özet

Otomotiv endüstrisinde dış trim parçaları, estetik algının ve marka kalitesinin doğrudan kullanıcıya yansıdığı kritik bileşenlerdir. Bu parçaların büyük çoğunluğu plastik malzemelerden üretilmekte olup, maliyet, ağırlık ve üretilebilirlik avantajları sunarken; aynı zamanda yüzey kalitesi açısından yüksek hassasiyet gerekmektedir. Özellikle Class-A yüzey gereksinimleri nedeniyle, bu parçalarda oluşabilecek en küçük görsel hata dahi müşteri algısını olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Plastik enjeksiyon süreçlerinde ortaya çıkan birleşme izi, akış izi ve çökme gibi yüzey kusurları; yalnızca üretim aşamasında değil, esas olarak tasarım sürecinde alınan kararların bir sonucu olarak ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle, hataların oluşumunu sonradan düzeltmek yerine, daha tasarım aşamasında öngörmek ve önlemek hem maliyet hem de zaman açısından kritik bir avantaj sağlamaktadır. Bu bildiride, otomotiv dış trim parçalarında yaygın olarak karşılaşılan yüzey hataları detaylı olarak ele alınacak; bu hataların kök nedenleri tasarım perspektifinden incelenecek ve erken aşamada uygulanabilecek önleyici mühendislik yaklaşımları sunulacaktır. Ayrıca, hataların sistematik olarak nasıl tespit edileceği, risklerin nasıl minimize edileceği ve tasarım doğrulama süreçlerinin nasıl optimize edileceği örnek uygulamalar üzerinden açıklanacaktır. Sonuç olarak bu çalışma, tasarım aşamasında alınacak doğru kararlarla üretim sonrası problemlerin nasıl minimize edilebileceğini ortaya koyarak, daha sürdürülebilir, maliyet etkin ve yüksek kaliteli ürün geliştirme süreçlerine katkı sağlamayı amaçlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Otomotiv Dış Trim, Görsel Kalite Hataları, Plastik Enjeksiyon, Tasarım Parametreleri, Class-A Yüzey Kalitesi, Önleyici Mühendislik.

Abstract

Automotive exterior trim parts are critical components where aesthetic perception and brand quality are directly reflected to the user. While the vast majority of these parts are manufactured from plastic materials, offering cost, weight, and manufacturability advantages, they also require high precision regarding surface quality. Especially due to Class-A surface requirements, even the smallest visual defect that may occur on these parts can negatively affect customer perception. Surface defects such as weld lines, flow marks, and sink marks occurring in plastic injection molding processes arise not only during the production phase but primarily as a result of decisions made during the design process. Therefore, predicting and preventing defects at the design stage, rather than correcting them after occurrence, provides a critical advantage in terms of both cost and time. In this paper, common surface defects encountered in automotive exterior trim parts will be discussed in detail, their root causes will be examined from a design perspective, and preventative engineering approaches that can be applied

at an early stage will be presented. Furthermore, how defects can be systematically detected, how risks can be minimized, and how design validation processes can be optimized will be explained through exemplary applications. Consequently, this study aims to contribute to more sustainable, cost-effective, and high-quality product development processes by demonstrating how post-production problems can be minimized through correct decisions taken at the design stage.

Keywords: Automotive Exterior Trim, Visual Quality Defects, Plastic Injection Molding, Design Parameters, Class-A Surface Quality, Preventative Engineering.

GİRİŞ

Otomotiv endüstrisinde dış trim parçaları, aracın estetik algısını ve marka kalitesini doğrudan kullanıcıya yansıtan kritik bileşenlerdir. Bu parçaların "Class-A" yüzey gereksinimlerini karşılaması; geometrik süreklilik, boya sonrası mükemmel ışık yansıması ve kusursuz bir doku bütünlüğü gerekmektedir (SAE International, 2021). Plastik enjeksiyon süreçlerinde karşılaşılan görsel kusurların (çökme (sink marks), çarpılma (warping), akış izi (flow marks) vb.) kök nedenleri incelendiğinde, bu hataların büyük çoğunluğunun üretim aşamasından ziyade tasarım aşamasında alınan geometrik kararlardan kaynaklandığı görülmektedir (Malloy, 2010). Tasarım aşamasında yüzey hatalarını öngörmek ve önleyici mühendislik yaklaşımları sergilemek hem kalıp revizyon maliyetlerini hem de projenin devreye alma süresini minimize etmek açısından büyük öneme sahiptir. Son yıllarda yürütülen çalışmalarda da vurgulandığı üzere, tasarım aşamasındaki enjeksiyon simülasyonlarının deneysel verilerle doğrulanması (simulation validation), Class-A yüzeylerdeki görsel hataları önlemede kritik bir adım olarak öne çıkmaktadır (Chen, Wang & Li, 2021).

Plastik parçaların karmaşık geometrileri ve malzeme özellikleri, enjeksiyon sırasında eriyik plastiğin akış dinamiğini ve soğuma davranışını doğrudan etkiler. Literatürde, üniform olmayan et kalınlığı dağılımının ve keskin köşe geçişlerinin bölgesel gerilim yığılmalarına sebep olduğu ifade edilmektedir (Shoemaker, 2006). Bu çalışma, otomotiv dış trim tasarımında yüzey hatalarının önlenmesine yönelik dağınık literatür bilgisini akademik ve endüstriyel standartlar çerçevesinde sistematik bir mühendislik yapısında bir araya getirmektedir. Bu derleme çalışmasının amacı, dış trim parçalarında yaygın olarak karşılaşılan yüzey hatalarını tasarım perspektifinden analiz etmek ve kritik tasarım parametreleri için optimize edilmiş mühendislik sınırlarını güncel literatür ışığında sentezlemektir. Bu sayede, Üretilirlik İçin Tasarım (DFM) prensiplerinin Class-A yüzey kalitesi üzerindeki etkisi sistematik bir literatür incelemesiyle ortaya konulacaktır.

YÖNTEM

Bu çalışma kapsamında, otomotiv dış trim parçalarında tasarım kaynaklı oluşan yüzey hatalarını önlemek amacıyla uygulanan DFM metodolojisi literatür taraması yöntemiyle incelenmiştir. Akademik derleme standartlarına tam uyum sağlamak adına, 2015–2026 yılları arasında Web of Science, Scopus ve Google Scholar veri tabanlarında indekslenen; otomotiv dış trim parça tasarımı, yüzey kusurları (surface defects) ve enjeksiyon simülasyon doğrulanması (injection molding simulation validation)

konularına odaklanan yaklaşık 45 bilimsel makale, uluslararası kalite standartları (SAE J1545) ve endüstriyel tasarım rehberleri sistematik olarak taranmıştır.

Literatür seçim kriteri olarak; hakemli dergilerde yayınlanmış olması, Class-A yüzey kalitesi parametrelerini içermesi ve simülasyon çıktılarının deneysel ya da prototip üretim verileriyle doğrulanmış olması şartları aranmıştır. Analiz sürecinde; et kalınlığı değişim oranları, radyüs değerleri ve feder (rib) geometrisi gibi bağımsız değişkenlerin görsel kalite üzerindeki etkilerini bilgisayar destekli simülasyonlar ve deneysel yöntemlerle inceleyen güncel çalışmalar (Chen vd., 2021; He, Zhang & Liu, 2022) merkeze alınmıştır. Elde edilen veriler, mevcut literatürdeki ortogonal deney ve doğrulama sonuçları üzerinden kantitatif olarak sentezlenmiş ve karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

BULGULAR

Literatür incelemesi sonucunda elde edilen bulgular, plastik parça tasarımında belirli geometrik limitlerin dışına çıkılmasının doğrudan görsel kusurlara yol açtığını göstermektedir. İlgili çalışmalar sistematik olarak gruplandırıldığında; akış stabilitesi, gerilim azaltma ve çökme önleme mekanizmalarının doğrudan belirli ampirik tasarım sınırlarına bağlı olduğu belirlenmiştir. Endüstriyel tasarım rehberlerinde ve simülasyon destekli çalışmalarda, parça nominal et kalınlığının (t) zorunlu değişim hallerinde dahi $\pm 25\%$ sınırları içinde tutulması gerektiği bildirilmektedir. Et kalınlığı geçişlerinin ani olduğu bölgelerde akış hız farkından kaynaklı hava kabarcığı (void) ve yüzey dalgalanması gözlemlendiği; 0.1 mm'lik değişimin 10 mm'lik alana yayıldığı kademeli geçişlerde ise akış cephesinin stabil kaldığı gösterilmiştir (Shoemaker, 2006; He vd., 2022).

Akış dinamiği ve stres yığılmaları açısından radyüs kullanımının kritik önemi, incelenen akademik çalışmalarda ortak bir bulgu olarak öne çıkmaktadır. Literatürde genel kabul gören limitler incelendiğinde, dolumun düzgün sağlanması ve köşelerde et kalınlığının korunması için iç radyüs değerinin en az 0.5t, dış radyüs değerinin ise en az 1.5t olarak seçilmesinin çarpılma riskini belirgin ölçüde azalttığı rapor edilmektedir (Malloy, 2010). Feder tasarımlarında ise, feder kalınlığının yüzey kalınlığının üçte birini ($t/3$) aşması durumunda A-yüzeyinde kaçınılmaz çökme izleri oluştuğu bildirilmektedir. Güncel araştırmalar da (Gim, Rhee & Park, 2020), bu tür geometrik aşırılıkların kontrol edilmesinin otomotiv parçalarında yüzey hatalarını minimize ettiğini göstermektedir. Ayrıca, feder yüksekliğinin 3t değerini aşmasının kalıp ayrılma aşamasında vakum etkisi yarattığı; kalıpta ters aç (undercut) bulunan bölgelerde zorunlu maça (slider) kullanımının estetik bölgede kalıcı ayırım hattı izleri oluşturduğu ve desenli yüzeylerde yetersiz çıkma açısının sıyırma (scuffing) hatasına neden olduğu teknik referanslarla gösterilmiştir (Kazmer, 2016). Sentezlenen tüm bu ampirik sınır değerleri ve bunların yapısal/görsel etkileri Tablo 1'de sistematik olarak özetlenmiştir.

Tablo 1. Literatürde Genel Kabul Gören Tasarım Limitleri ve Etkileri

Parametre	Önerilen Limit	Etki / Gerekçe
Et kalınlığı değişimi	$\pm\%25$	Çarpılma (warp) ve çökme (sink) artışını önleme
Geçiş oranı (Gradual)	0.1 mm / 10 mm	Akış stabilitesi sağlama ve akış izlerini engelleme
İç radyüs	$\geq 0.5t$	Gerilim (stres) yığılmasını azaltma
Dış radyüs	$\geq 1.5t$	Dolum iyileşmesi ve köşe kalınlık üniformluğu
Feder (Rib) kalınlığı	$\leq t/3$	Görsel yüzeyde çökme izi oluşumunu önleme
Feder (Rib) yüksekliği	$\leq 3t$	Vakum etkisini ve kalıptan çıkma zorluğunu önleme

SONUÇ VE TARTIŞMA

Bu literatür derlemesi, otomotiv dış trim parçalarında karşılaşılan Class-A yüzey hatalarının büyük oranda tasarım aşamasında belirlenen geometrik parametrelerle önlenebileceğini göstermektedir. Bulgular ışığında, üniform et kalınlığı dağılımının ve kademeli geçişlerin, parçanın yapısal bütünlüğü ve görsel kalitesi için vazgeçilmez olduğu sonucuna varılmıştır. Et kalınlığı değişimlerinin kontrol altında tutulmaması, sadece görsel hatalara değil, aynı zamanda bölgesel soğuma farklarından kaynaklanan ciddi çarpılma ve boyutsal kararsızlık problemlerine yol açmaktadır. Bu durum, montaj aşamasında parça uyum sorunlarını tetikleyerek toplam kalite maliyetini artırmaktadır (Shoemaker, 2006; Gim vd., 2020).

Sonuç olarak, yüksek kaliteli ve sürdürülebilir bir ürün geliştirme süreci için tasarımın ilk aşamalarından itibaren DFM kuralları ve simülasyon destekli doğrulama verileri entegre edilmelidir. Özellikle dış trim gibi estetik hassasiyeti yüksek parçalarda, kalıp ayırma hatlarının görsel olmayan bölgelere taşınması ve feder tasarımlarında $t/3$ kalınlık sınırına sadık kalınması kritik başarı faktörleridir. Gelecekte yapılacak çalışmalarda, farklı termoplastik polimer karışımlarının bu tasarım limitleri üzerindeki spesifik etkilerinin ve geri dönüştürülmüş plastik kullanımının yüzey kalitesi parametrelerine yansımalarının yeni Moldflow analizleri ve deneysel çalışmalarla araştırılması önerilmektedir.

KAYNAKÇA

- Bayer MaterialScience (Covestro) Design Guide. (2019). *Part and Mold Design - Thermoplastics*.
- Chen, Z., Wang, X., & Li, Y. (2021). Simulation and experimental validation of injection molding for Class-A surface automotive exterior parts. *Journal of Manufacturing Processes*, 64, 456-467. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.02.012>
- Gim, J., Rhee, B., & Park, K. (2020). Optimization of injection molding process to minimize sink marks and warpage of automotive parts. *Materials*, 13(18), 4004. <https://doi.org/10.3390/ma13184004>
- He, W., Zhang, L., & Liu, X. (2022). Warpage and surface defect optimization of injection-molded automotive parts based on Moldflow and orthogonal experiments. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 120, 3123-3135. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-09041-5>

- Kazmer, D. O. (2016). *Injection Mold Design Engineering* (2nd ed.). Hanser Publications.
<https://doi.org/10.3139/9781569905715>
- Malloy, R. A. (2010). *Plastic Part Design for Injection Molding: An Introduction*. Hanser Publications.
<https://doi.org/10.3139/9781569904336>
- Rosato, D. V., & Rosato, M. G. (2012). *Injection Molding Handbook*. Springer Science & Business Media.
- SAE International. (2021). *Surface Appearance and Quality Standards for Automotive Exterior Trim (J1545)*.
- Shoemaker, J. (2006). *Moldflow Design Guide: A Resource for Plastics Engineers*. Hanser Publications.
- Tres, P. A. (2014). *Designing Plastic Parts for Assembly*. Hanser Publications.

2K/3K Enjeksiyon Teknolojilerinde Tasarım ve Proses Yaklaşımları ile Otomotiv Dış Trim Parçalarına Sağladığı Avantajlar

Gökçe Özyapı¹, Mümin Bahar², Ahmet Sucu³

¹ gokce.ozyapi@tofas.com.tr; Tofas Türk Otomobil Fabrikası Ar-Ge Merkezi, Bursa / Türkiye.

² mumin.bahar@tofas.com.tr; Tofas Türk Otomobil Fabrikası Ar-Ge Merkezi, Bursa / Türkiye.

³ ahmet.sucu@tofas.com.tr; Tofas Türk Otomobil Fabrikası Ar-Ge Merkezi, Bursa / Türkiye.

Özet

İki ve üç bileşenli enjeksiyon kalıplama (2K/3K injection molding) teknolojileri, otomotiv endüstrisinde özellikle dış trim parçalarının fonksiyonel, yapısal ve estetik performansını optimize etmek amacıyla yaygınlaşan ileri üretim yöntemlerindendir. Bu çalışma, 2K/3K teknolojilerini dış trim özelinde tasarım, arayüzey, proses ve yüzey kalitesi başlıkları altında sistematik biçimde değerlendirmeyi amaçlayan bir literatür derlemesidir. Çalışma kapsamında, çok bileşenli enjeksiyon süreçlerindeki polimer uyumluluk matrisleri, arayüzey adezyon mekanizmaları, enjeksiyon sekansları ve diferansiyel büzülme gibi kritik mühendislik parametreleri analiz edilmiştir. Ayrıca, 3K teknolojisinin sunduğu çoklu fonksiyonel entegrasyon avantajları, artan kalıp karmaşıklığı ve Class-A yüzey kısıtları (akış izleri, kaynak çizgileri) ile proses riskleri, literatürde raporlanan vaka bulgularına dayalı nicel literatür verileri ışığında kapsamlı bir biçimde tartışılmaktadır.

Anahtar Kelimeler: 2K/3K Enjeksiyon, Otomotiv Dış Trim, Class-A Yüzey, Polimer Adezyonu, Proses Kısıtları, Çoklu Enjeksiyon Mimarisi.

Abstract

Two- and three-component injection molding (2K/3K injection molding) technologies are advanced manufacturing methods increasingly used in the automotive industry to optimize functional, structural, and aesthetic performance of exterior trim parts. This study presents a systematic literature review evaluating 2K/3K technologies in the context of exterior trim, focusing on design, interface behavior, process parameters, and surface quality. Within the scope of the study, critical engineering parameters such as polymer compatibility matrices, interfacial adhesion mechanisms, injection sequences, and differential shrinkage were analyzed. In addition, the multi-functional integration capabilities of 3K technology, along with increased mold complexity and Class-A surface constraints (flow marks, weld lines), are comprehensively discussed based on reported case studies and quantitative literature findings.

Keywords: 2K/3K Enjeksiyon, Otomotiv Dış Trim, Class-A Yüzey, Polimer Adezyonu, Proses Kısıtları, Çoklu Enjeksiyon Mimarisi.

1. Giriş

Otomotiv endüstrisinde ağırlık azaltma, parça entegrasyonu ve yüksek algılanan kalite arayışları, dış trim bileşenlerinin üretiminde çok malzemeli enjeksiyon teknolojilerinin kullanımını artırmıştır. Geleneksel tek bileşenli üretimlerde, farklı mekanik veya estetik fonksiyonlara sahip parçaların ayrı ayrı basılıp sekonder operasyonlarla (mekanik klipsleme, ultrasonik kaynak veya kimyasal yapıştırma) birleştirilmesi gerekmektedir. Bu durum tolerans zinciri yönetimini zorlaştırmakta, montaj işçiliklerini artırmakta ve uzun vadeli çevresel dayanım performansını olumsuz etkileyebilmektedir. İki bileşenli (2K) ve üç bileşenli (3K) enjeksiyon teknolojileri, farklı polimer kombinasyonlarını tek bir kalıp çevriminde bir araya getirerek bu riskleri azaltma potansiyeline sahiptir.

Bu çalışma 2K/3K teknolojilerini dış trim özelinde tasarım, arayüzey, proses ve yüzey kalitesi başlıkları altında sistematik biçimde değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Bu doğrultuda, çok bileşenli enjeksiyon süreçlerinin sadece sağladığı stilistik özgürlükler ve parça entegrasyon avantajları değil; aynı zamanda yüksek kalıp yatırımı maliyetleri, diferansiyel büzülme kaynaklı çarpılma riskleri ve Class-A yüzey standartlarını etkileyen akış kusurları gibi endüstriyel kısıtları da bütüncül bir yaklaşımla ele alınmıştır.

2. Literatür İnceleme Yaklaşımı

Bu çalışma, çok bileşenli termoplastik enjeksiyon teknolojilerinin otomotiv dış trim parçalarındaki tasarım ve proses sınırlarını belirlemek amacıyla gerçekleştirilmiş bir literatür derlemesidir. İnceleme kapsamında, uluslararası akademik veri tabanlarında (ScienceDirect, Scopus, Google Scholar) yer alan ve özellikle SAE, SPE, CIRP ile Polymer Engineering dergilerinde yayımlanan son dönem çalışmalar, otomotiv malzeme standartları ve endüstriyel tasarım kılavuzları sistematik olarak taranmıştır.

Tarama kapsamında ağırlıklı olarak 2005–2025 yılları arasında yayımlanmış akademik makaleler, teknik kitaplar ve otomotiv uygulamalarına yönelik teknik bildiriler dikkate alınmıştır. Bu süreçte yaklaşık 45 bilimsel çalışma detaylı olarak incelenmiştir. Değerlendirmeye, çok bileşenli enjeksiyon teknolojilerinin otomotiv dış trim uygulamalarında malzeme uyumluluğu, arayüzey adezyonu, proses penceresi ve yüzey kalitesi üzerindeki etkilerini doğrudan ele alan çalışmalar dahil edilmiş; sadece genel plastik enjeksiyon parametrelerini inceleyen veya otomotiv dış trim gereksinimlerini (UV, sızdırmazlık, Class-A) kapsamayan çalışmalar ise kapsam dışı bırakılmıştır. Değerlendirme sürecinde; polimerlerin termodinamik uyumluluğu, arayüzey adezyon enerjileri, 2K/3K kalıp içi mekanizmaları (döner tabla, core-back, indeksleme) ve Class-A yüzey hatalarının kök nedenleri üzerine yoğunlaşmıştır. Literatürde doğrulanmış ampirik veriler, endüstriyel uygulama örnekleri ve proses pencereleri üzerinden yarı-nicel bir kıyaslama modeli oluşturularak endüstriyel çıktılar değerlendirilmiştir.

3. Arayüzey Adezyonu ve Tasarımın Mühendislik Boyutları

Çok bileşenli enjeksiyon proseslerinde iki veya daha fazla malzemenin arayüzeyde gösterdiği yapışma performansı; seçilen polimerlerin kimyasal uyumluluğuna, yüzey enerjilerine ve proses parametrelerine doğrudan bağlıdır. Arayüzey bütünlüğü genel olarak mekanik kilitlenmeler ve kimyasal (moleküler) adezyon olmak üzere iki temel mekanizma ile sağlanabilmektedir.

3.1. Mekanik Kilitlenme ve Kimyasal Adezyon Farkı

Kimyasal adezyon, kalıba enjekte edilen birinci bileşenin yüzeyinin, ikinci bileşenin yüksek sıcaklıktaki eriyiği ile kısmen yeniden erimesi ve polimer zincirlerinin arayüzeyde birbirinin içine difüzyon göstermesi (interdiffusion) ile oluşur (Kühnert & Ehrenstein, 2005). Bu durum, malzemelerin benzer çözünürlük parametrelerine ve yüzey enerjilerine sahip olmasını gerektirir. Kimyasal uyumluluğun zayıf olduğu durumlarda (örneğin bazı mühendislik plastikleri ile elastomerler arasında), parça tasarımına kırılgan kuyruğu (dovetail), delikler veya pürüzlü yüzey tekstürleri eklenerek mekanik kilitlenme mekanizması aktif edilir. Mekanik kilitlenme, kimyasal bağların yetersiz kaldığı hibrit tasarımlarda arayüzey ayrılma (delaminasyon) mukavemetini destekleyici bir unsur olarak işlev görmektedir.

3.2. Malzeme Uyumluluk Matrisi ve Proses Sıcaklıklarının Etkisi

Başarılı bir arayüzey yapışması için kalıp sıcaklığı ve eriyik sıcaklığının optimizasyonu kritiktir. Birinci enjeksiyon bileşeninin kalıptaki soğuma süresi gereğinden uzun tutulursa, yüzey kristallenmesi tamamlanır ve ikinci bileşenin eriyiği birinci bileşenin yüzeyini eritemez; bu da delaminasyon riskini doğurur (Jansen & Wang, 2022). Literatürde kabul gören ve otomotiv dış trim parçalarında sıkça karşılaşılan bazı temel malzeme kombinasyonları ve uyumluluk düzeyleri, bu çalışma kapsamında literatür bulguları doğrultusunda proses kısıtlarıyla birlikte tartışılmıştır.

4. Proses Riskleri, Tasarım Sınırlandırmaları ve Yöntem Kıyaslamaları

Çok bileşenli enjeksiyon teknolojileri önemli avantajlar sunmakla birlikte, uygun tasarım ve proses koşulları sağlanmadığı takdirde ciddi üretim hatalarına sebebiyet verebilmektedir. Temel proses kısıtları şu şekildedir:

- Diferansiyel Büzülme ve Çarpılma (Warpage) Riski: Farklı polimerlerin hacimsel büzülme (shrinkage) oranları birbirinden farklıdır. Örneğin, yarı kristalin bir malzeme olan PP ile amorf bir malzeme arayüzeyde birleştiğinde, soğuma esnasında farklı oranlarda çekme gösterirler. Bu diferansiyel büzülme, parça içinde yüksek kalıcı gerilmelere ve dolayısıyla montaj geometrisini bozan çarpılmalara (warpage) yol açabilmektedir.
- Yolluk Girişi (Gate Location) ve Akış İzleri: Class-A yüzey beklentisi olan dış trim parçalarında yolluk girişlerinin konumu kritik bir mühendislik kararıdır. İkinci veya üçüncü bileşenin enjeksiyonu esnasında oluşan yüksek kesme gerilmeleri (shear rate), birinci bileşenin yüzeyinde "akış izleri" (flow marks) veya parlaklık farklılıkları (gloss variation) oluşturabilmektedir (Chen vd., 2020). Ayrıca,

çoklu enjeksiyon hatlarında eriyik cephelerinin karşılaştığı bölgelerde mekanik olarak zayıf ve görsel olarak kusurlu kaynak çizgileri (weld lines) oluşma riski mevcuttur.

Proses yönetimindeki bu risklerin minimize edilebilmesi, seçilen çok bileşenli enjeksiyon yönteminin yapısal kısıtlarının doğru analiz edilmesine bağlıdır. Literatürde yer alan temel 2K/3K üretim yöntemlerinin mühendislik karakteristikleri Tablo 1'de karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Tablo 1. 2K/3K Enjeksiyon Yöntemlerinin Mühendislik ve Tasarım Parametreleri Açısından Karşılaştırma Matrisi

Kalıplama Yöntemi	Tipik Malzeme Kombinasyonu	Belirgin Proses Avantajı	Kritik Tasarım Kısıtı / Risk	Otomotiv Dış Trim Uygulama Örneği	Literatür Kaynağı
Overmolding	PP + TPE PC/ABS + TPU	Ek kimyasal yapıştırıcı / montaj ihtiyacını elimine etme potansiyeli.	Arayüzeyde dar termal pencere; hatalı çevrimde delaminasyon riski.	Hava yönlendirici (Airguide) entegre fitilleri, dış çıtalar.	Goodship & Love (2002); Jansen & Wang (2022)
Insert Molding	Metal Pres Parça + PA66-GF30	Lokal bölgede çok yüksek mekanik rijitlik ve tork dayanımı.	Insert yerleşiminde robotik tolerans hataları; kaynak çizgisi (weld line) riski.	Yapısal dış braketler, tampon arkası montaj kuleleri.	Osswald vd. (2008)
Edge-to-Edge	Şeffaf PC + Opak PC PMMA + ABS	Renk ve ışık geçişlerinde keskin, pürüzsüz ve sızdırmaz arayüzey hattı.	Eriyik cephelerinin karışma riski; çok hassas valf-gate zamanlaması gereksinimi.	Arka stop lamba lensleri, ışıklı ön ızgara panelleri.	Turner vd. (2021)
Skin Molding	ASA (Skin) + Rejenerat PP (Core)	Düşük maliyetli/geri dönüştürülmüş çekirdek ile	Çekirdek malzemenin dış kabuğu yırtma riski (core breakthrough);	Yüksek parlaklıklı B-Sütun kaplamaları,	Chen vd. (2020); Ilinca & Hétu (2012)

Kalıplama Yöntemi	Tipik Malzeme Kombinasyonu	Belirgin Proses Avantajı	Kritik Tasarım Kısıtı / Risk	Otomotiv Dış Trim Uygulama Örneği	Literatür Kaynağı
		Class-A yüzey eldesi.	katı kalınlık oranı kısıtı.	plakalık trimleri.	

5. 3K Çoklu Enjeksiyon Teknolojisi: Proses Mimarisi ve 2K'dan Farkları

3K enjeksiyon teknolojisi, iki bileşenli (2K) sistemlerin yeteneklerini bir adım öteye taşıyarak üç farklı malzemenin veya rengin tek bir kalıplama çevriminde birleştirilmesini sağlamaktadır. 2K sistemler genellikle bir sert yapısal gövde ve bir esnek sızdırmazlık elemanı ile sınırlıyken; 3K mimarisi aynı parça üzerinde "Yapısal Taşıyıcı + Optik/Görsel Katman + Esnek Sızdırmazlık" kombinasyonunun tek proseste üretilmesine imkân tanımaktadır.

5.1. 3K Proses Sekansları (Shot Sequence) ve Kalıp Mimarisi

3K enjeksiyon süreçlerinde üç temel enjeksiyon ünitesi (primer, sekonder ve tersiyer) belirli bir zaman ve mekân sekansı içinde çalışır. Kalıp mimarisi, entegre bir döner tabla (rotary table) yardımıyla genellikle 120° veya 180° döndürülür ya da hareketli maçalar (core-back) ardışık olarak geri çekilerek yeni enjeksiyon hacimleri oluşturulur. Literatürde rapor edildiği üzere, 3K enjeksiyon kalıpları, çok eksenli hareket mekanizmaları, bağımsız çalışan yolluk sistemleri ve kompleks soğuma hatları nedeniyle yüksek kalıp mühendisliği seviyesini temsil eder. 2K kalıplarına kıyasla mekanik sıkışma, aşınma ve flanş bölgelerinde çapak (flash) oluşumu riskleri çok daha yüksektir. Ancak bu karmaşıklık, tasarımcılara sekonder montaj hatlarını büyük ölçüde azaltma konusunda üstün bir stilistik özgürlük sunmaktadır (Hopmann & Michaeli, 2016).

5.2. Otomotiv Dış Trim İçin Literatürde Belirtilen 3K Uygulama Örnekleri

Otomotiv dış triminde 3K teknolojinin en somut uygulama alanlarından biri, entegre tavan çıtaları ve yüksek parlaklıklı (high-gloss) B/C sütun kaplamalarıdır. Mühendislik açısından değerlendirildiğinde, geleneksel üretimde parlak plastik kaplama, alt taşıyıcı braket ve kauçuk fitil olmak üzere üç ayrı parçadan oluşan bu sistem, 3K teknolojisi ile tek çevrimde üretilabilmektedir (Turner vd., 2021). Bu uygulama senaryosunda; ABS alt taşıyıcı yapıyı, PMMA dış estetik Class-A yüzeyi, TPE ise araca montajda sızdırmazlık sağlayan esnek fitil geometrisini oluşturur. Benzer şekilde, yeni nesil LED entegreli ön ızgara gruplarında; opak taşıyıcı gövde, renkli ışık geçirgen optik katman stealth tasarımı ve sızdırmazlık TPE contası tek bir 3K proses sekansı ile üretilabilmektedir.

6. Literatürden Elde Edilen Değerlendirmeler ve Uygulama Analizleri

Yapılan literatür değerlendirmeleri ve endüstriyel uygulama örnekleri, çok bileşenli enjeksiyon yaklaşımlarının otomotiv dış trim tasarımındaki kronik fonksiyonel ve estetik sorunları çözmede önemli bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir. Bu bağlamda, dış trim parçalarının temel performans gereksinimleri ile literatürde raporlanan çok bileşenli enjeksiyon çözümleri ve elde edilen nicel/yarı-nicel kazanım değerleri Tablo 2'de sistematik hale getirilmiştir. Tablodaki değerler uygulamaya, parça geometrisine ve OEM standartlarına bağlı olarak değişkenlik gösterebilmekte olup, literatürde doğrulanmış örnek ve tipik kabul aralıklarını temsil etmektedir.

Tablo 2. Otomotiv Dış Trim Gereksinimleri ile Çok Bileşenli (2K/3K) Enjeksiyon Çözümleri Eşleştirme ve Kazanım Matrisi

Dış Trim Performans Gereksinimi	Kritik Teknik Parametre ve Örnek Performans Hedefleri	Önerilen Çok Bileşenli Tasarım Yaklaşımı	Literatürde Raporlanan Tipik Kazanım ve Kabul Aralıkları	Kaynak No
Uzun Ömürlü Sızdırmazlık	OEM Standartları (IP67 / IP69K), Kalıcı Deformasyon (Compression Set < %25)	Sert PP gövde üzerine kimyasal uyumlu esnek TPE enjeksiyonu (2K Overmolding).	Geleneksel fitillere kıyasla montaj işçilik maliyetlerinde %40 ila %60 oranında azalma potansiyeli.	Goodship & Love (2002); Turner vd. (2021)
Estetik ve Görsel Kalite (Class-A)	Yüzey Dalgalanması ($W_t < 0.3 \mu m$), Parlaklık Toleransı ($\Delta Gloss < 1.5$)	Sıralı valf yolluk denetimli 2K/3K Enjeksiyon (ABS + PMMA / ASA).	Sekonder boya prosesinin %100 elimine edilebilmesi; çizilme direncinde artış ve yüzey pürüzsüzlüğü optimizasyonu.	Chen vd. (2020); Jansen & Wang (2022)
Çökme Kontrolü (Sink Mark Prevention)	Kalın Feder Bölgelerinde Çökme Derinliği ($S_d < 10 \mu m$)	Çekirdek bölgesinde gaz/köpük katkı veya düşük büzülmeli polimer	Geleneksel tek bileşenli enjeksiyona kıyasla, kalın montaj kulelerinin ön yüzeyindeki çökme hatalarında %80'e varan iyileşme.	Ilinca & Hétu (2012)

Dış Trim Performans Gereksinimi	Kritik Teknik Parametre ve Örnek Performans Hedefleri	Önerilen Çok Bileşenli Tasarım Yaklaşımı	Literatürde Raporlanan Tipik Kazanım ve Kabul Aralıkları	Kaynak No
		kullanımı (2K Skin-Core).		
Akustik ve NVH Performansı	Parça Esnekliği ve Sönümlleme Katsayısı ($\tan \delta > 0.4$)	Temas yüzeylerine lokal TPE/TPU yastıkçık enjeksiyonu (2K Overmolding).	Trim parçalarının birbirine sürtünmesinden kaynaklanan gıcırtı seslerinin ve rüzgâr uğultusunun 2–4 dB aralığında sönümlenebilmesi.	Kazmer (2016); Kühnert & Cosmic (2021)
Boyutsal Kararlılık ve Kalıp Yönetimi	Çarpılma (Warpage <1.0 mm), Çevrim Süresi (Cycle Time, sn)	Optimize edilmiş kalıp içi endeksleme veya döner tabla mekanizmaları.	Montaj adımlarının teke inmesiyle toplam operasyon süresinde %30'a varan kazanç; ancak kalıp ilk yatırım maliyetinde 2 ila 2.5 kat artış riski.	Bhattacharya & Bhattacharya (2019); Hopmann & Michaeli (2016)

6.1. Hava Yönlendirici (Airguide) Komponentlerinde Sızdırmazlık Analizi

Ön tampon arkasında konumlanan hava yönlendirici (airguide) bileşenlerinde, motor soğutma verimliliği için tampon ve radyatör arasında sızdırmazlık sağlanması gerekmektedir. Tablo 2'de detaylandırıldığı üzere, literatürde rapor edilen vaka bulgularına göre, 2K overmolding yöntemiyle doğrudan sert PP gövde üzerine enjekte edilen TPE dudak tasarımları, montaj esnasında tampon yüzeyine aşırı mekanik baskı uygulamadan işlevsel bir sızdırmazlık bariyeri oluşturabilmektedir. Mühendislik açısından değerlendirildiğinde bu yaklaşım, sonradan yapıştırılan fitillerde zamanla oluşan kopma ve sarkma gibi kalite problemlerini potansiyel olarak elimine edebilecek niteliktedir.

6.2. Et Kalınlığı Yönetimi ve Çökme Hatalarının Kontrolü

Dış trim parçalarının arka yüzeyinde yapısal mukavemet amacıyla tasarlanan kalın federler (ribs) veya montaj kuleleri, ön yüzeyde termal büzülme kaynaklı estetik çökmelere neden olabilmektedir. Literatürde, sandviç kalıplama (Skin/Core Molding) teknikleri kullanılarak parçanın iç çekirdeğine (core) ikinci fazda köpürtücü ajan katkılı veya daha düşük büzülme oranına sahip bir polimer enjekte

edilmesinin, dış cildin (skin) kalıp duvarına doğru içten kalibre edilmesini sağladığı gösterilmiştir (Ilinca & Hétu, 2012). Bu yöntem, uygun tasarım ve proses koşullarında çökme derinliğini $S_d < 10 \mu m$ seviyesinin altına indirerek Class-A yüzey pürüzsüzlüğünün korunmasını mümkün kılmaktadır.

7. Sonuç ve Tartışma

Bu sistematik literatür derlemesi, 2K ve 3K enjeksiyon teknolojilerinin otomotiv dış trim parçalarında parça entegrasyonu, ağırlık azaltma ve estetik kaliteyi artırma noktasında güçlü mühendislik çözümleri sunduğunu ortaya koymaktadır. Ancak bu teknolojilerin başarısı; iddia edilen mutlak performans parametrelerinden ziyade, malzeme kombinasyonlarının doğru seçilmesine, kalıp içi termal dengelerin hassas yönetilmesine ve diferansiyel büzülme kaynaklı çarpılma risklerinin tasarım aşamasında (Moldflow simülasyonları ile) öngörülmesine bağlıdır.

3K teknolojisi, 2K'ya kıyasla tasarım esnekliğini ve fonksiyonel entegrasyonu üst seviyeye çıkarırken, kalıp mimarisi zorluklarını ve ilk yatırım maliyetlerini de belirgin biçimde artırmaktadır. Bu nedenle, yüksek hacimli serilerde (mass production) birim maliyet avantajı sağlanabilmekteyken, düşük hacimli projelerde ekonomik fizibilitesi sınırlı kalabilmektedir. Gelecek çalışmalarda, otomotiv endüstrisinin sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda, geri dönüştürülmüş (PCR) polimerlerin ve biyo-kompozitlerin çoklu enjeksiyon sistemlerindeki arayüzey adezyon performanslarının ve Class-A yüzey kısıtlarının deneysel olarak incelenmesi literatüre önemli katkılar sağlayacaktır.

8. Kaynakça

- Bhattacharya, A., & Bhattacharya, S. (2019). Multi-component injection molding: A review. *Materials Today: Proceedings*, 18, 4421–4428.
- Chen, S. C., Peng, H. S., & Chang, J. A. (2020). Effect of dynamic mold temperature control on the surface quality of multi-component injection molded parts. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 116, 104675. doi:10.1016/j.icheatmasstransfer.2020.104675
- Cosmic, M., & Kühnert, I. (2021). Advanced adhesion evaluation in multi-component injection molding. *Polymer Engineering & Science*, 61(4), 1105–1115. doi:10.1002/pen.25652
- Goodship, V., & Love, J. C. (2002). *Multi-material injection moulding*. Shawbury, UK: Smithers Rapra Technology.
- Hopmann, C., & Michaeli, W. (2016). *Principles of polymer processing*. Munich, Germany: Hanser Publications.
- Ilinca, F., & Hétu, J. F. (2012). Three-dimensional simulation of the co-injection molding process: Interface position and skin thickness. *Polymer Engineering & Science*, 52(4), 812–823. doi:10.1002/pen.22132
- Jansen, K. M. B., & Wang, J. (2022). Interfacial adhesion development in multi-component injection molding of rigid-flexible polymer combinations. *Polymer Engineering & Science*, 62(11), 3560–3572. doi:10.1002/pen.26092
- Kazmer, D. O. (2016). *Injection mold design engineering* (2nd ed.). Munich, Germany: Carl Hanser Verlag.

Osswald, T. A., Turng, L. S., & Gramann, P. J. (2008). *Injection molding handbook*. Munich, Germany: Hanser Publications.

Turner, R., Davis, L., & Evans, M. (2021). Advancements in multi-shot injection molding for automotive exterior lighting and trim integration. *SAE Technical Paper*, 2021-01-1244.
doi:10.4271/2021-01-1244

Otomotiv Dış Trim Uygulamalarında Logo Üretim Teknolojileri: Dekorasyon Yöntemleri ve Araç Üstü Doğrulama Prosesleri

Gökçe ÖZYAPI¹, Mısra Nur ÖZCAN²

¹gokce.ozyapi@tofas.com.tr; Tofas Türk Otomobil Fabrikası Ar-Ge Merkezi, Bursa / Türkiye.

²misra.nurozcan@tofas.com.tr; Tofas Türk Otomobil Fabrikası Ar-Ge Merkezi, Arge, Bursa / Türkiye.

Özet

Otomotiv tasarımında markanın imza elementi rolünü üstlenen dış kısım amblemleri ve logoları, yalnızca yüksek görsel kalite sunmakla kalmayıp aynı zamanda zorlu çevre koşullarına karşı da yüksek direnç göstermek zorundadır. Bu çalışmada, otomotiv projelerinde yaygın olarak kullanılan üç temel logo teknolojisi (plastik enjeksiyon, esnek poliüretan ve alüminyum tabanlı uygulamalar) teknik bir perspektifle incelenmiştir.

Çalışma kapsamında, kendinden boyalı (MIC), boyalı ve geleneksel elektrokaplama (krom) varyantları dahil olmak üzere enjeksiyonla kalıplanmış amblemlerin karakteristik özellikleri analiz edilmiştir. Ayrıca, tasarımcılara kavisli yüzeylerde önemli bir esneklik sağlayan 3D poliüretan reçine teknolojilerinin (örneğin Kromex) sunduğu kabiliyetler ele alınmıştır. Dahası, daha premium bir görünüm için tercih edilen ve fırçalama, serigrafi ve tampon baskı gibi teknikler kullanılarak dekore edilen alüminyum amblemlerin üretim süreçleri değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Otomotiv Amblemleri, Plastik Enjeksiyon, Krom Kaplama, Esnek Reçine, Alüminyum Logolar, Dekorasyon Yöntemleri, Araç Üstü Doğrulama.

Abstract

Exterior emblems, which serve as a signature element of the brand in automotive design, are not only required to deliver high visual quality but also to withstand harsh environmental conditions. In this study, three fundamental logo technologies widely used in automotive projects—namely plastic injection, flexible polyurethane, and aluminum-based applications—are examined from a technical perspective.

Within the scope of the study, the characteristics of injection-molded emblems, including Mold-in-Color (MIC), painted, and conventional electroplated (chrome) variants, are analyzed. In addition, the capabilities offered by 3D polyurethane resin technologies (e.g., Kromex), which provide designers with significant flexibility on curved surfaces, are discussed. Furthermore, the manufacturing processes of aluminum emblems, which are preferred for a more premium appearance and are decorated using techniques such as brushing, screen printing, and pad printing, are evaluated.

Keywords: Automotive Emblems, Plastic Injection, Chrome Plating, Flexible Resin, Aluminum Logos, Decoration Methods, On-Vehicle Validation.

1. GİRİŞ

Otomotiv dış trim bileşenleri, aracın aerodinamik performansına, estetik bütünlüğüne ve marka algısına doğrudan etki eden kritik unsurlardır. Bu bileşenler arasında yer alan marka logoları ve amblemler, araç tasarımının odak noktasını oluşturarak markanın kurumsal kimliğini ve tasarım felsefesini dış dünyaya yansıtan en önemli “imza” elementleridir. Günümüz otomotiv pazarında, tüketici algısındaki “premium” beklentilerin artması ve tasarım trendlerinin hızla değişmesi, dış trim logolarının hem görsel çeşitliliğini hem de teknik karmaşıklığını artırmıştır (Müller & Poth, 2018).

Bir otomotiv logosu, estetik beklentilerin ötesinde, aracın maruz kaldığı tüm zorlu dış ortam koşullarına karşı ömür boyu dayanım göstermek zorundadır. Araç seyir halindeyken veya park halindeyken logolar; ultraviyole (UV) ışınlarına, aşırı sıcaklık dalgalanmalarına (termal şoklar), nem ve tuz sisi gibi korozyif ortamlara, yol kimyasallarına (asfalt atıkları, deterjanlar, kışın yollara dökülen tuzlar) ve taş çarpmalarına maruz kalır. Bu durum, logoların üretiminde kullanılan malzemelerin ve dekorasyon yöntemlerinin çok sıkı mühendislik standartlarına göre seçilmesini zorunlu kılar (ISO, n.d.; Davis, 2001).

Bu çalışmada, modern otomotiv projelerinde pazar payı en yüksek olan üç temel logo üretim teknolojisi teknik olarak ele alınmıştır: Plastik enjeksiyon tabanlı logolar, esnek poliüretan (3D reçine) logolar ve alüminyum tabanlı logolar. Çalışmanın temel amacı, bu üç farklı teknolojinin dekorasyon esnekliğini, üretim proseslerini ve maliyet bileşenlerini karşılaştırmalı olarak analiz etmek ve nihai ürün kalitesini garanti altına alan endüstriyel “araç üstü” (on-vehicle) doğrulama metodolojilerini ortaya koymaktır (Sukan & Yıldız, 2022).

2. LOGO ÜRETİM TEKNOLOJİLERİ VE DEKORASYON YÖNTEMLERİ

2.1. Plastik Enjeksiyon Tabanlı Logolar

Plastik enjeksiyon teknolojisi, yüksek üretim hacmine sahip otomotiv projelerinde geometrik özgürlük ve boyutsal kararlılık sağlaması nedeniyle en yaygın tercih edilen yöntemdir (Sukan & Yıldız, 2022). Bu teknolojiye logonun mekanik altyapısını oluşturan substrat malzemesi olarak genellikle ABS (Akrilonitril Bütadien Stiren) veya PC/ABS (Polikarbonat/ABS) alaşımları kullanılır. Dekorasyon biçimine göre üç ana grupta incelenir:

Kendinden Renkli Plastikler (Mold-in-Color- MIC): Bu yöntemde, plastik hammaddesi enjeksiyon öncesinde masterbatch ile renklendirilir. Genellikle yüksek parlaklık ve UV dayanımı gereksinimleri için ASA (Akrilonitril Stiren Akrilat) veya PMMA (Polimetil Metakrilat) gibi polimerler tercih edilir. Ek bir yüzey işlemi gerektirmediği için parça başı maliyeti en düşük yöntemdir ancak metalik/derinlik algısı sınırlıdır (Müller & Poth, 2018).

Boyalı Logolar (Painted Logos): Enjeksiyon kalıbından çıkan plastik substrat, yüzey aktivasyon işlemlerinin (plazma veya alevle işlem) ardından otomotiv standartlarına uygun astar, baz kat ve UV dirençli şeffaf vernik (clearcoat) ile boyanır. Genellikle gövde rengiyle kontrast oluşturacak parlak siyah (piano black) veya mat gri tonlarında tercih edilir.

Geleneksel Elektrokaplama (Krom Kaplama): Plastik yüzeyine kimyasal ve elektro-kimyasal yöntemlerle gerçek metal tabakalarının biriktirilmesi prosesidir. ABS veya PC/ABS substrat üzerindeki bütadien fazı kromik asit ile dağlanarak yüzeyde mikro gözenekler oluşturulur. Ardından sırasıyla paladyum aktivasyonu, kimyasal nikel, elektro-bakır, elektro-nikel ve krom kaplama katmanları uygulanır (Sukan & Yıldız, 2022). Son yıllarda çevre regülasyonları nedeniyle Hexavalent Krom (Cr6+) yerine Trivalent Krom (Cr3+) teknolojilerine geçiş hız kazanmıştır.

2.2. Esnek Poliüretan (3D Reçine) Logolar

Özellikle son dönem otomotiv tasarımlarında, bagaj kapağı veya çamurluk gibi hafif kavisli (3D formlu) yüzeylere mükemmel uyum sağlayabilen esnek poliüretan reçine teknolojileri (sektörde bilinen adıyla Kromex veya kubbe/oming teknolojisi) öne çıkmaktadır (Müller & Poth, 2018).

Bu yöntemin üretim esası, basılı veya kesilmiş bir grafik taşıyıcı (genellikle serigrafi baskılı poliüretan veya krom etkili PVC/PET folyo) üzerine, hassas dozajlama kafaları ile iki bileşenli (poliol ve izosiyanat) sıvı poliüretan reçinenin dökülmesine dayanır. Reçine, yüzey gerilimi sayesinde folyonun kenarlarına kadar yayılır ve taşmadan durarak doğal bir mercek (kubbe) efekti oluşturur.

PU reçinenin kürlenmesi (termal veya UV ile) sonucunda, logoya yüksek bir görsel derinlik ve mikron mertebesinde kalınlık kazandırılır. Bu teknolojinin en büyük avantajı, poliüretanın "self-healing" (kendi kendini onarma) yeteneğidir; dışarıdan gelen hafif çizikler malzemenin elastik yapısı sayesinde zamanla kapanır. Ayrıca esnek yapısı, logonun montaj yüzeyindeki form hatalarını tolere etmesini sağlar (Müller & Poth, 2018).

2.3. Alüminyum Tabanlı Logolar

Alüminyum logolar, özellikle lüks ve premium segment araçlarda, malzemenin kendine has soğuk dokunma hissi (cold touch) ve yüksek prestij algısı nedeniyle tercih edilir. Üretimde genellikle 5000 serisi (Al-Mg) veya 6000 serisi (Al-Mg-Si) alüminyum alaşımları kullanılır. Proses adımları progresif metal presleme/kesme işlemleriyle başlar ve ardından şu dekorasyon teknikleriyle zenginleştirilir:

Fırçalama (Brushing): Alüminyum yüzeyine mekanik aşındırıcı fırçalarla doğrusal veya dairesel mikro çizgiler kazandırılarak saten bir doku elde edilir.

Serigrafi ve Tampon Baskı (Screen & Pad Printing): Logonun marka yazı karakteri veya renkli detayları, dış ortam koşullarına dayanıklı epoksi veya poliüretan bazlı boyalar kullanılarak serigrafi (düz yüzeyler için) veya silikon tamponlar vasıtasıyla (hafif kavisli yüzeyler için) aktarılır.

Eloksal (Anodizasyon) ve Koruyucu Katmanlar: Dekorasyon işlemleri tamamlanan alüminyum parça, elektrokimyasal bir proses olan eloksal işlemine tabi tutularak yüzeyinde yapay ve gözenekli bir

oksit tabakası (Al₂O₃) oluşturur. Bu gözenekler boya pigmentlerini hapsetmek için kullanılabilir ve ardından "sealing" (kapatma) işlemiyle korozyon direnci maksimuma çıkarılır (Davis, 2001).

3. TEKNİK VE EKONOMİK KARŞILAŞTIRMA

Farklı logo üretim teknolojilerinin otomotiv projelerinin devreye alma süreçlerinde (maliyet, zaman, tasarım) gösterdiği karakteristik özellikler aşağıdaki tabloda özetlenmiştir:

Tablo 1. Logo teknolojilerinin teknik ve ekonomik karşılaştırması

Karşılaştırma Kriterleri	Plastik Enjeksiyon (Krom Kaplama)	Esnek Poliüretan (Kromex vb.)	Alüminyum Tabanlı Logolar
Kalıp/Yatırım Maliyeti	Çok Yüksek (Çelik enjeksiyon kalıpları, kaplama askıları)	Çok Düşük (Prototip/seri üretim için dijital kesim ve döküm hatları)	Orta - Yüksek (Progresif kesme ve form verme kalıpları)
Tasarım Özgürlüğü (Geometri)	Çok Yüksek (Karmaşık 3D formlar, tırnaklı bağlantılar)	Orta (Düz veya tek eksenli kavisli yüzeyler, kubbe formu sınırlı)	Orta (Derin çekme sınırları, keskin bükümler risklidir)
Görsel Derinlik / Premium Algı	Yüksek (Gerçek krom parlaklığı)	Çok Yüksek (Mercek/lens etkisi sağlayan şeffaf PU katmanı)	Maksimum (Gerçek metal dokusu ve soğuk temas hissi)
Kavisli Yüzeylere Uyum	Yok (Sert parça, araç yüzey geometrisine tam uymalıdır)	Mükemmel (Esnek yapısıyla farklı kavis yarıçaplarına adapte olur)	Sınırlı (Montaj öncesi ön form verilmesi gerekir)
Geliştirme Süresi (Lead Time)	Uzun (12-16 Hafta)	Çok Kısa (2-4 Hafta)	Orta (8-12 Hafta)

4. ARAÇ ÜSTÜ (ON-VEHICLE) DOĞRULAMA METODOLOJİLERİ

Otomotiv dış trim uygulamalarında logoların laboratuvar ölçekli malzeme testlerinden geçmesi yeterli değildir. Parçanın nihai geometrisiyle, montaj yöntemiyle (genellikle endüstriyel yüksek performanslı çift taraflı akrilik köpük bantlar veya entegre tırnaklar) ve araç üzerindeki konumuyla doğrulanması gerekir. Bu doğrulamalar, logonun ömrü boyunca araçtan ayrılmayacağını (düşmeyeceğini) ve yüzey kalitesinin bozulmayacağını garanti eder.

4.1. Yüksek Basıncılı Su Jeti ile Yapışma Testi (High-Pressure Water Jet Adhesion)

Bu test, özellikle kış aylarında veya çamurlu sürüş sonrası araç kullanıcılarının ticari oto yıkama istasyonlarında logolara çok yakından uyguladığı yüksek basınçlı su etkisini simüle eder. ISO 16925 standardı referans alınarak gerçekleştirilen testin parametreleri şu şekildedir:

Su Basıncı: 60- 100 bar aralığında (genellikle 90 bar tercih edilir).

Su Sıcaklığı: 60°C- 80°C (termal şok etkisi yaratmak için).

Mesafe ve Açı: Logo yüzeyine 100 mm- 150 mm mesafeden, 45° ve 90°'lik açılarla uygulama yapılır.

Uygulama Süresi: Logo geometrisinin kritik köşe ve kenarlarına minimum 30 saniye boyunca su jeti doğrudan tutulur.

Değerlendirme: Test sonrasında logonun boya, krom veya poliüretan katmanlarında herhangi bir soyulma, kalkma, kabarma veya logonun araç gövdesine tutunmasını sağlayan çift taraflı bantta bir ayrılma (delaminasyon) meydana gelmemelidir.

4.2. Otomatik Fırçalı Yıkama Sistemleri Simülasyonu (Automated Brush Washing)

Araçların ömürleri boyunca yüzlerce kez maruz kaldığı otomatik yıkama tünellerindeki döner fırçaların yarattığı mekanik kesme kuvvetleri ve sürtünme etkileri logolar için büyük bir risk taşır. Laboratuvar ortamında ISO 20566 (Amtec-Kistler fırçalı yıkama cihazı) standardına göre yapılan testlerde:

Özel polietilen veya naylon yıkama fırçaları, belirli bir eksenel yük altında parça üzerinde döndürülür. Yıkama suyuna, gerçek yol kirlerini simüle etmek adına belirli oranlarda silis bazlı toz/çamur süspansiyonu karıştırılır.

Logolar standart olarak 10 ila 30 çevrim (cycle) boyunca bu mekanik fırçalamaya maruz bırakılır.

Değerlendirme: Alüminyum ve plastik enjeksiyon logolarda yüzeyde oluşan mikro çiziklerin derinliği (gloss kaybı) ölçülür. Esnek poliüretan logolarda ise malzemenin elastik geri dönüşümü ve çizik direnci kalitatif olarak kontrol edilir. Logo kenarlarının fırça kıllarına takılarak kopması veya yerinden oynaması kesin bir hata (fail) olarak kabul edilir.

4.3. Kombine Çevresel Yaşlandırma ve Titreşim Testleri

Logoların araç üstü dayanımı, çevre testlerinin (Nem testi ISO 6270-2, Tuz Sisi ISO 9227) ardından yapılan mekanik testlerle de sınanır. Özellikle bagaj kapağının sert kapatılması (slamming testi) esnasında logoya binen atalet kuvvetleri, logo yapışkan bandının veya tırnaklarının mukavemetini ölçer. Çevresel yaşlandırma (klimatik şok) çevrimlerinden çıkan logoların araç üstü fırça veya su jeti testlerine tabi tutulması, yaşlanmış malzemenin gerçek performansını görmek açısından kritik önemdedir.

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, otomotiv dış trim uygulamalarında kullanılan üç temel logo üretim teknolojisi teknik ve operasyonel yönleriyle incelenmiş ve şu sonuçlara ulaşılmıştır:

Plastik enjeksiyon tabanlı logolar, özellikle yüksek adetli projelerde parça başı maliyet avantajı ve tırnaklı/klipsli entegre montaj çözümleri sunması sebebiyle ana akım üretim metodu olmaya devam

etmektedir. Ancak yüksek kalıp yatırımı gereksinimi, düşük adetli projeler veya sık makyajlanan (facelift) modeller için ekonomik bir dezavantaj oluşturmaktadır.

Esnek poliüretan reçine teknolojileri (Kromex vb.), kalıp yatırımı gerektirmemesi ve çok kısa devreye alma süreleri ile tasarımcılara yüksek esneklik sunmaktadır. Özellikle kavisli gövde panellerine mükemmel uyum sağlaması ve poliüretanın kendi kendini onarma (self-healing) kabiliyeti, bu teknolojinin dış trim projelerindeki pazar payını hızla artırmaktadır.

Alüminyum logolar, estetik derinlik, özgün fırçalama dokuları ve sunduğu premium algı ile lüks segment araçların vazgeçilmez bir unsuru olmaya devam etmektedir. Ancak alüminyumun şekillendirilme sınırlarındaki geometrik kısıtlar, tasarım aşamasında dikkatle yönetilmelidir.

Otomotiv sektöründe logoların başarısı, sadece ilk günkü görsel kalitelerine değil, ISO 16925 ve ISO 20566 gibi endüstriyel standartlarla simüle edilen zorlu araç üstü (on-vehicle) doğrulama testlerindeki performanslarına bağlıdır. Doğru substrat, doğru dekorasyon ve doğru montaj kombinasyonu, markanın imzasını aracın tüm kullanım ömrü boyunca korumasını sağlayacaktır.

KAYNAKÇA

- International Organization for Standardization. (n.d.). *ISO 16925: Paints and varnishes—Determination of the resistance of coatings to pressure water-jetting*.
- International Organization for Standardization. (n.d.). *ISO 20566: Paints and varnishes—Determination of the scratch resistance of a coating system using a laboratory car-wash*.
- International Organization for Standardization. (n.d.). *ISO 9227: Corrosion tests in artificial atmospheres—Salt spray tests*.
- Davis, J. R. (2001). *Surface engineering for corrosion and wear resistance*. ASM International.
- Müller, B., & Poth, U. (2018). *Coatings formulation: An international textbook* (3rd ed.). Vincentz Network.
- Sukan, M., & Yıldız, T. (2022). Advanced surface electroplating processes on ABS/PC substrates in automotive applications. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 31(4), 2845–2856.

Otomotivde Air Guide Bileşenlerinin Termal Yönetim ve Aerodinamik Performanstaki Rolü

Görkem ÖZTAŞ¹, Umut AKGÜN²

¹gorkem.oztas@tofas.com.tr; TOFAŞ Türk Otomobil Fabrikası A.Ş. Ar-Ge Merkezi, Bursa, Türkiye.

²umut.akgun@tofas.com.tr; TOFAŞ Türk Otomobil Fabrikası A.Ş. Ar-Ge Merkezi, Bursa, Türkiye.

Özet

Modern otomotiv mühendisliğinde, sıkı emisyon hedefleri ve sürdürülebilir enerji verimliliği gereksinimleri doğrultusunda termal yönetim ve aerodinamik performans araç tasarımının en kritik odak noktalarından biri haline gelmiştir. Bu bağlamda, genellikle ön tampon arkasında ve ön modül çevresinde stratejik olarak konumlandırılan air guide bileşenleri, hava akışını optimize ederek sistem verimliliğini artıran temel elemanlar olarak öne çıkmaktadır. İçten yanmalı motorlu araçlarda radyatör soğutma performansını iyileştiren bu parçalar, elektrikli araç teknolojilerinde batarya ve güç elektroniği termal yönetiminin vazgeçilmez bir parçasıdır. Bu çalışmada, air guide bileşenlerinin hava kaçaklarını önleme, aerodinamik sürüklenme katsayısını kalıcı olarak düşürme ve basınç kayıplarını minimize etme işlevleri teorik ve pratik çerçevede detaylıca incelenmektedir. Ayrıca, bileşenlerin endüstriyel üretiminde yaygın olarak kullanılan standart enjeksiyon kalıplama ve sızdırmazlık performansını artıran iki bileşenli (2K) kalıplama teknolojileri teknik açıdan karşılaştırmalı şekilde değerlendirilmiştir. Sonuç olarak, doğru tasarlanmış hava yönlendirme geometrilerinin araç enerji tüketimine sağladığı pozitif katkılar ortaya konmuş ve geleceğin aktif sistemleri ile akışkanlar dinamiği destekli tasarım yaklaşımlarına dair literatüre literatürü destekleyecek temel bulgular paylaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Air Guide, Otomotiv Mühendisliği, Termal Yönetim, Hava Akışı Kontrolü, Enjeksiyon Kalıplama, İki Bileşenli Kalıplama (2K), Soğutma Performansı, Aerodinamik.

Abstract

In modern automotive engineering, in line with stringent emission targets and sustainable energy efficiency requirements, thermal management and aerodynamic performance have become one of the most critical focal points of vehicle design. In this context, air guide components, typically positioned strategically behind the front bumper and around the front-end module, stand out as fundamental elements that increase system efficiency by optimizing airflow. These parts, which improve radiator cooling performance in internal combustion engine vehicles, are an indispensable part of battery and power electronics thermal management in electric vehicle technologies. In this study, the functions of air guide components in preventing air leaks, permanently reducing the aerodynamic drag coefficient, and minimizing pressure losses are examined in detail within a theoretical and practical framework. Furthermore, standard injection molding, widely used in the industrial production of these components, and two-shot (2K) molding technologies that enhance sealing performance are comparatively evaluated from a technical perspective. Consequently, the positive contributions of properly designed air guiding geometries to vehicle energy consumption are demonstrated, and

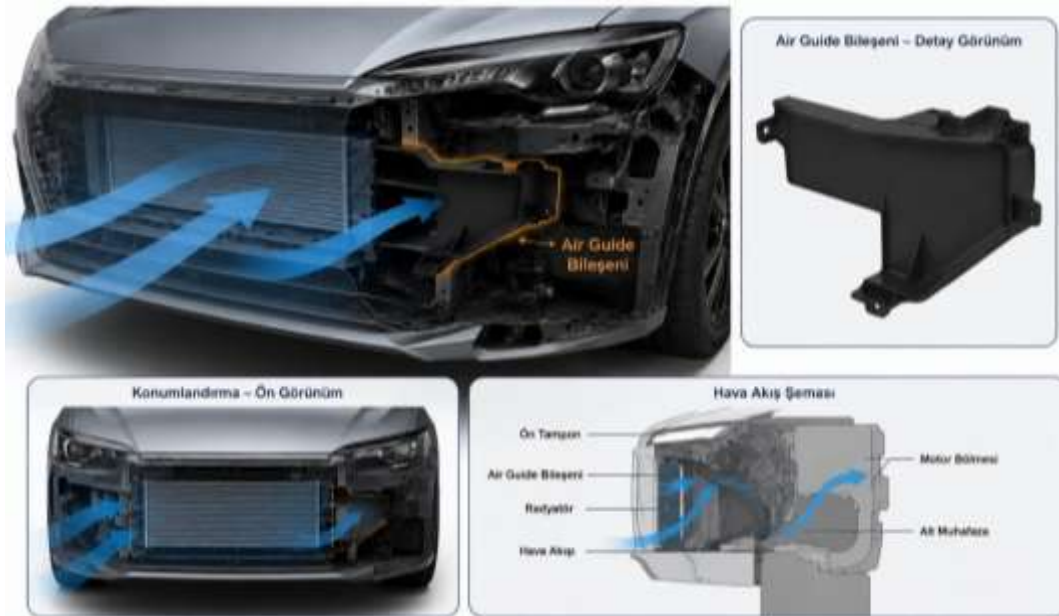
fundamental findings supporting the literature regarding future active systems and computational fluid dynamics (CFD) supported design approaches are shared..

Keywords: Air Guide, Automotive Engineering, Thermal Management, Airflow Control, Injection Molding, Two-Shot Molding (2K), Cooling Performance, Aerodynamics.

GİRİŞ

Modern otomotiv mühendisliğinde araç verimliliği, emisyon regülasyonları, enerji tüketimi hedefleri ve müşteri beklentilerindeki artış nedeniyle en önemli tasarım parametrelerinden biri haline gelmiştir. Bu doğrultuda, termal yönetim (Thermal Management) ve aerodinamik optimizasyon çalışmaları hem içten yanmalı motorlu araçlarda (ICE) hem de elektrikli araçlarda (EV) kritik mühendislik alanları olarak değerlendirilmektedir. Özellikle araç ön yüzeyinden giriş yapan hava akışının kontrollü şekilde yönlendirilmesi, soğutma performansının artırılması ve aerodinamik sürüklenme katsayısının (Drag Coefficient) düşürülmesi açısından büyük önem taşımaktadır.

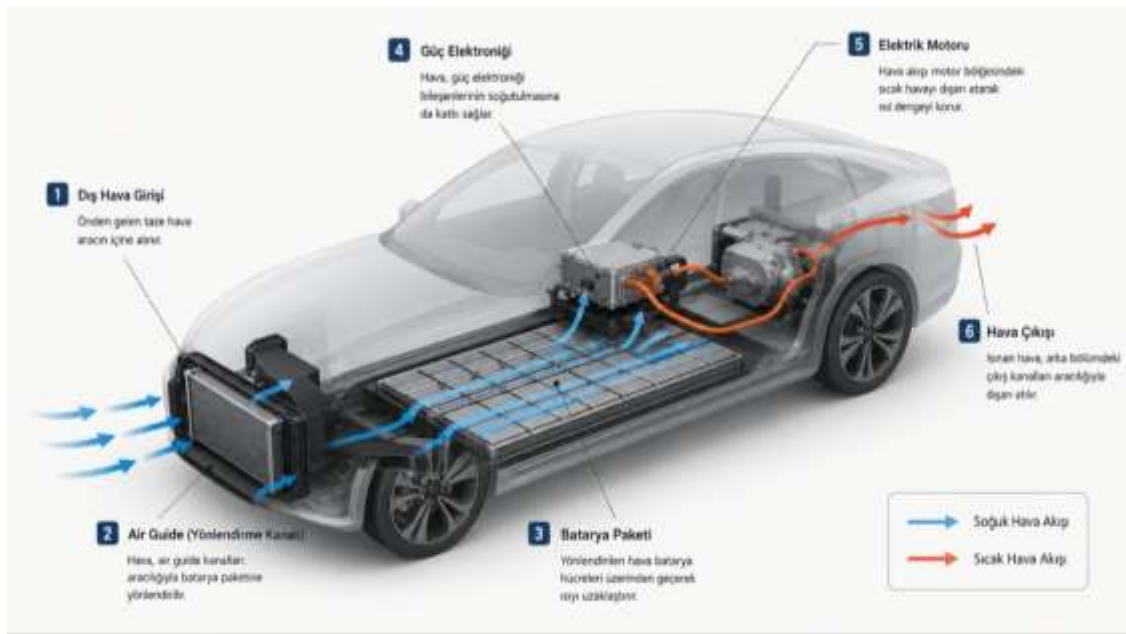
Air guide bileşenleri, genellikle ön tampon arkasında, ön modül (Front End Module – FEM) ve soğutma paketi çevresinde konumlandırılan ince cidarlı plastik hava yönlendirme elemanları olarak tanımlanmaktadır. Bu bileşenler; radyatör, kondanser, intercooler, fren soğutma kanalları ve hava emiş sistemleri gibi kritik alt sistemlere yönlendirilen hava akışını kontrol etmek amacıyla tasarlanmaktadır. Tipik olarak 2.0–2.5 mm nominal et kalınlığına sahip olan bu parçalar, hava kaçaklarını azaltmak, by-pass akışını engellemek ve hava akışının ısı değiştiriciler üzerinden etkin şekilde geçmesini sağlamak amacıyla kullanılmaktadır.



Şekil 1. Ön Tampon Arkasında Konumlandırılmış Tipik Air Guide Bileşeni

Geleneksel içten yanmalı motorlu araçlarda air guide sistemleri çoğunlukla radyatör soğutma performansını iyileştirmek ve motor bölmesi içerisindeki hava dağılımını optimize etmek amacıyla

kullanılmaktadır. Ancak elektrikli araç teknolojilerindeki hızlı gelişim ile birlikte bu bileşenlerin önemi büyük ölçüde artmıştır. Mühendislik araçlarda batarya paketleri, güç elektroniği bileşenleri ve elektrik motorları dar sıcaklık aralıklarında çalıştırılmak zorunda olduğundan, kontrollü hava yönetimi kritik bir mühendislik gereksinimi haline gelmiştir. Özellikle lityum-iyon bataryaların optimum çalışma sıcaklık aralığının (genellikle 15°C ile 35°C arası) dışına çıkması, termal kaçak (thermal runaway) riskini artırmakta ve batarya ömrünü önemli ölçüde kısaltmaktadır (Pesaran, 2002). Bu nedenle air guide bileşenleri, EV termal yönetim mimarisinin temel parçalarından biri olarak değerlendirilmektedir (Şekil 2).

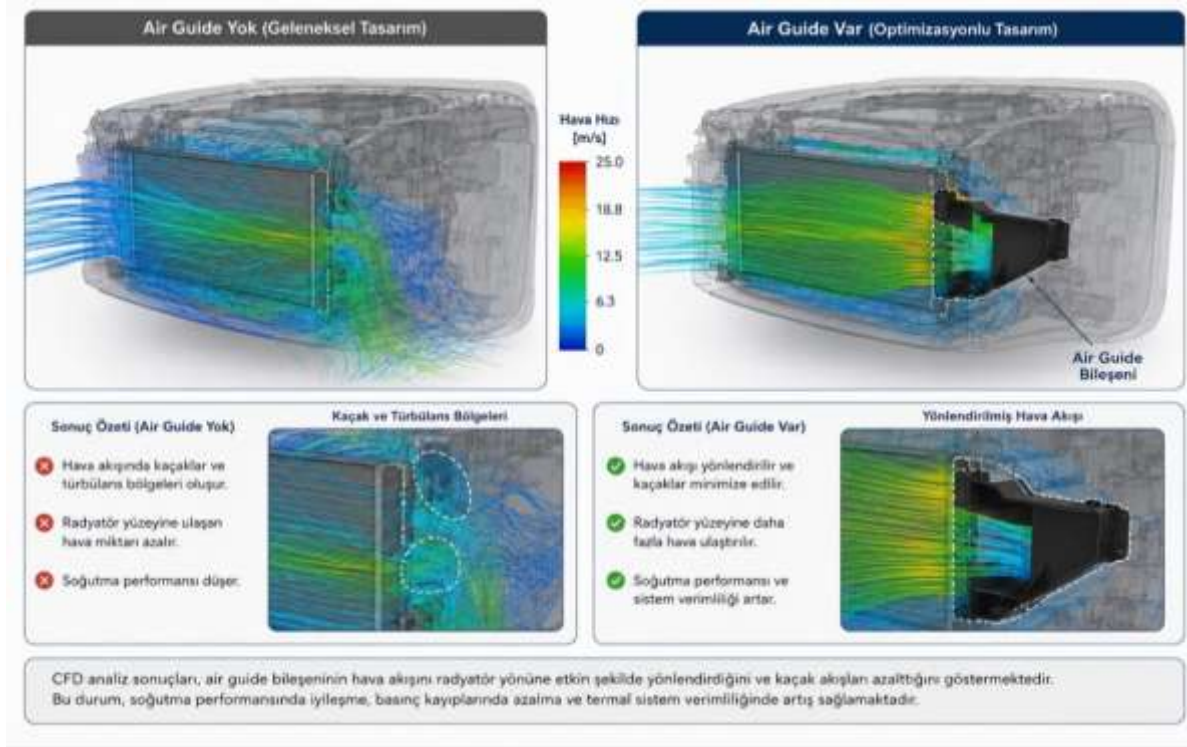


Şekil 2. Elektrikli Araçlarda Batarya Soğutma ve Hava Akış Yönlendirme Şeması

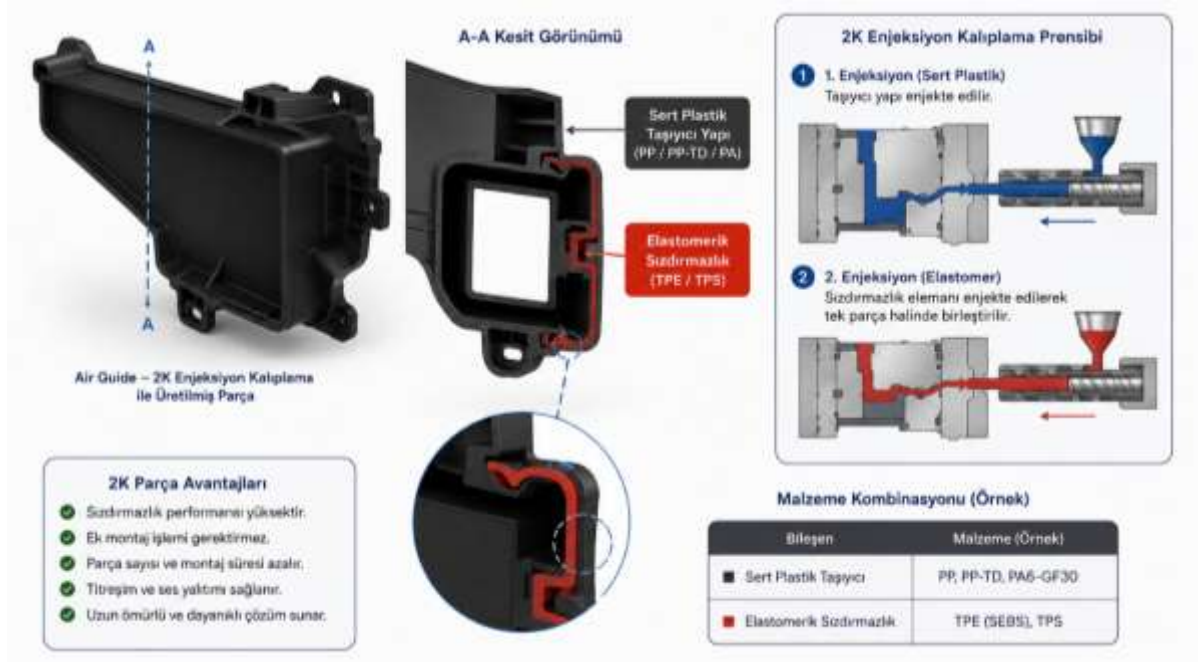
Termal performansın yanı sıra, air guide sistemleri araç aerodinamiğine de doğrudan katkı sağlamaktadır. Ön tampon bölgesinden kontrolsüz şekilde motor bölmesine giren hava akışı; türbülans oluşumuna, basınç kayıplarına ve aerodinamik sürükleme kuvvetinin artmasına neden olmaktadır. Bu durum araç enerji tüketimini olumsuz yönde etkilemektedir. Doğru şekilde tasarlanmış air guide geometrileri sayesinde hava akışı düzenlenmekte, türbülans azaltılmakta ve soğutma verimliliği korunurken aerodinamik kayıpların minimize edilmesi sağlanmaktadır. Bu nedenle söz konusu bileşenler, aerodinamik performans ile termal yönetim arasındaki dengeyi sağlayan önemli mühendislik elemanları olarak görülmektedir (Şekil 3).

Air guide bileşenlerinin üretiminde yaygın olarak enjeksiyon kalıplama (Injection Molding) yöntemleri kullanılmaktadır. Özellikle PP, PP-TD ve PA bazlı termoplastik malzemeler tercih edilmektedir. Otomotiv endüstrisinde hafifletme (lightweighting) stratejileri kapsamında, araç ağırlığını düşürerek yakıt tüketimini ve emisyonları azaltmak amacıyla air guide bileşenlerinde mineral veya cam elyaf takviyeli (PP-TD, PP-GF) termoplastik kompozitlerin kullanımı giderek standartlaşmaktadır (Mallick, 2010). Yüksek üretim adetleri, kompleks geometrilerin üretilebilmesi ve düşük çevrim süreleri nedeniyle enjeksiyon kalıplama yöntemi otomotiv endüstrisinde yaygın biçimde uygulanmaktadır.

Bununla birlikte gelişmiş uygulamalarda iki bileşenli kalıplama (2K Injection Molding) teknolojileri kullanılmakta, sert plastik taşıyıcı yapı ile elastomerik sızdırmazlık elemanları tek parça halinde üretilmektedir (Şekil 4). Üretim yöntemi, parça yüzey kalitesi, geometrik hassasiyet ve sızdırmazlık performansı üzerinde doğrudan etkili olduğundan, hava akış karakteristiğini ve dolayısıyla sistem performansını belirleyen önemli faktörlerden biri olarak değerlendirilmektedir.



Şekil 3. Air Guide Kullanımı ile Hava Akış Yönlendirme Karşılaştırması



Şekil 4. 2K Enjeksiyon Kalıplama ile Üretilmiş Air Guide Kesit Yapısı

Otomotiv sektöründe hava yönlendirme (air guide) bileşenlerinin aerodinamik ve termal yönetim üzerindeki etkileri, akademik araştırmaların ve endüstriyel Ar-Ge çalışmalarının temel odak noktalarından biri olmuştur. Literatürde aerodinamik sürüklenme (drag) ve soğutma havası akışı arasındaki ilişkiyi temel düzeyde inceleyen öncü eserlerden biri Hucho (1998) tarafından kaleme alınan "Aerodynamics of Road Vehicles" adlı çalışmadır (Hucho, 1998). Hucho, araç ön yüzeyinden giren havanın ısı değiştiriciler etrafındaki seyahatinin, aracın toplam aerodinamik sürüklenme katsayısına yaklaşık %10 oranında negatif etki edebileceğini belirtmektedir. Bu durum, ön ızgara arkasındaki by-pass akışlarının (hava sızıntılarının) air guide bileşenleri vasıtasıyla engellenmesinin kritik önemini ortaya koymaktadır.

Son yıllarda elektrikli araç (EV) teknolojilerindeki ivmelenme ile birlikte güncel literatür, batarya termal yönetim sistemlerine (BTMS) yoğunlaşmıştır. SAE International bünyesinde yayınlanan "EV Thermal Management Systems and Airflow Optimization Studies" gibi raporlar, geleneksel içten yanmalı motorlara kıyasla batarya paketlerinin çok daha dar bir optimum çalışma sıcaklık aralığına sahip olduğunu vurgulamaktadır. Bu hassas denge, ön modülde yer alan air guide bileşenlerinin havayı doğrudan termal kondansatörlere, chiller ünitelerine ve batarya soğutma plakalarına homojen bir şekilde yönlendirme görevini kritik bir mühendislik zorunluluğu haline getirmiştir.

Statik air guide tasarımlarına ek olarak, aktif aerodinamik sistemlerle ilgili literatür de hızla genişlemektedir. Aktif Ön Izgara Sistemleri (Active Grille Shutters- AGS) ile entegre çalışan air guide yapıları üzerine yapılan akademik araştırmalar, motor soğutma ihtiyacının düşük olduğu senaryolarda ızgaraların kapatılmasıyla elde edilen aerodinamik kazanımın, arkadaki air guide kanal geometrisinin kapalı hacim aerodinamiğine ne kadar uyumlu olduğuna bağlı olduğunu göstermektedir. Bu sistemlerin

otayol sürüşlerinde aracın genel sürüklenme katsayısını (Cd) 0.015 ile 0.025 puan arasında iyileştirdiği akademik çevrelerce doğrulanmıştır.

Üretim yöntemleri literatürüne bakıldığında ise, plastik komponent tasarımı ve kalıplama teknolojileri üzerine yapılan çalışmalar öne çıkmaktadır. Otomotiv plastik parça tasarım prensiplerini inceleyen temel kaynaklarda, karmaşık geometrilere sahip hava yönlendiricilerin üretiminde karşılaşılan çarpılma (warpage) ve çekme (shrinkage) gibi deformasyonların hava sızdırmazlık performansını zayıflatığı belirtilmektedir. Bu bağlamda, literatürde sıkça incelenen İki Bileşenli (2K) Enjeksiyon Kalıplama teknolojisi, sert taşıyıcı plastik bir omurga ile yumuşak elastomerik sızdırmazlık dudaklarının tek bir çevrimde kalıplanmasına olanak tanımaktadır. Araştırmalar, 2K teknolojisinin kullanımıyla montaj toleranslarından kaynaklanan by-pass kaçaklarının büyük oranda azaltılabildiğini kanıtlamaktadır.

YÖNTEM

Bu çalışmada otomotiv air guide bileşenlerinin termal yönetim ve aerodinamik performans üzerindeki etkileri teorik ve teknik değerlendirme yöntemleri kullanılarak analiz edilmiştir. Çalışma kapsamında hava akış kontrolü, soğutma verimliliği, aerodinamik sürüklenme ve üretim teknolojileri arasındaki ilişki mühendislik perspektifiyle incelenmiştir.

Günümüzde hava yönlendirme sistemlerinin tasarım süreçlerinde Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) analizleri, fiziksel prototipleme maliyetlerini büyük oranda düşürürken akışkan davranışının ve basınç dağılımlarının yüksek doğrulukla tahmin edilmesine olanak tanımaktadır (Katz, 2016).

İlk aşamada, araç ön modülünde kullanılan air guide bileşenleri konum ve fonksiyonlarına göre sınıflandırılmıştır. Ön tampon, radyatör modülü, hava emiş sistemi ve yardımcı soğutma üniteleri arasında konumlandırılan bileşenler; hava yönlendirme, hava kaçaklarının önlenmesi ve akış optimizasyonu açısından değerlendirilmiştir (Şekil 5).



Şekil 5. Araç Ön Modülünde Air Guide Konumlandırma Bölgeleri

Sonraki aşamada, air guide bileşenlerinin termal ve aerodinamik davranışları temel akışkanlar mekaniği prensipleri doğrultusunda analiz edilmiştir (Incropera, DeWitt, Bergman, & Lavine, 2007). Hava akışının doğru yönlendirilmesi ile radyatör ve diğer ısı değiştiriciler üzerinden geçen efektif hava debisinin artırıldığı değerlendirilmiştir. Ayrıca kontrolsüz hava akışının neden olduğu türbülans oluşumu, basınç kayıpları ve sürüklenme kuvvetindeki artış incelenmiş; air guide geometrilerinin bu etkileri azaltmadaki rolü değerlendirilmiştir.

Çalışma kapsamında yaygın üretim yöntemleri de teknik açıdan incelenmiştir. Enjeksiyon kalıplama, blow molding ve iki bileşenli kalıplama (2K) yöntemleri; geometrik hassasiyet, yüzey kalitesi, yapısal dayanım, sızdırmazlık performansı ve seri üretim uygunluğu açısından karşılaştırılmıştır (Tablo 1).

Tablo 1. Air Guide Üretim Yöntemlerinin Teknik Karşılaştırması

Üretim Yöntemi	Avantajları	Dezavantajları
Enjeksiyon Kalıplama	Yüksek hassasiyet, seri üretim uygunluğu	Kalıp maliyeti yüksektir
Blow Molding	Hafif yapı üretimi	Geometrik hassasiyet sınırlıdır
2K Enjeksiyon	Yüksek sealing performansı	Proses karmaşıklığı yüksektir

SONUÇ VE TARTIŞMA

Air guide bileşenleri, modern otomotiv mühendisliğinde düşük maliyetli ancak yüksek etkili termal ve aerodinamik optimizasyon elemanları arasında yer almaktadır. Özellikle elektrikli araç teknolojilerinin gelişmesiyle birlikte, kontrollü hava yönlendirme sistemlerinin önemi daha da artmıştır. Doğru tasarlanmış air guide geometrileri sayesinde soğutma performansının artırıldığı, hava kaçaklarının azaltıldığı ve aerodinamik sürüklenme kayıplarının minimize edildiği değerlendirilmiştir. Gelecekte aktif hava yönlendirme sistemleri, adaptif geometriler ve CFD destekli optimizasyon çalışmalarının air guide tasarımlarında daha yaygın hale geleceği öngörülmektedir.

KAYNAKÇA

Hucho, W. H. (1998). *Aerodynamics of road vehicles* (4th ed.). SAE International.

Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergman, T. L., & Lavine, A. S. (2007). *Fundamentals of heat and mass transfer* (6th ed.). John Wiley & Sons.

Katz, J. (2016). *Automotive aerodynamics*. John Wiley & Sons.

Mallick, P. K. (2010). Materials, design and manufacturing for lightweight vehicles. Woodhead Publishing.

Pesaran, A. A. (2002). Battery thermal management in EV and HEVs: issues and solutions. Battery Man, 59(5), 34-49.

Investigation of Vortex Generator Effects on Interior Aeroacoustic Noise in the A-Pillar and Side Mirror Region of a Passenger Car

Ayhan YAĞCI¹, Muhammed Taha SIRMA²

¹ayhan.yagci@tofas.com.tr; TOFAŞ Türk Otomobil Fabrikası A.Ş. R&D Center, Bursa/ Türkiye.

²muhammed.tahasirma@tofas.com.tr TOFAŞ Türk Otomobil Fabrikası A.Ş. R&D Center, Bursa/ Türkiye.

Özet

Aerodinamik gürültü, özellikle akış kaynaklı basınç dalgalanmalarının baskın hale geldiği otoyol hızlarında, iç kabin konforunu etkileyen kritik bir faktör olmaya devam etmektedir. Bu çalışma, bir binek araçta dış dikiz aynası ve A-sütunu (A-pillar) bölgesi çevresinde girdap üreteçlerinin (VG) iç aeroakustik performans üzerindeki etkisini incelemektedir. Bu amaçla, söz konusu bölgelerin etrafına stratejik olarak yerleştirilen girdap üreteçleri ile dört farklı konfigürasyon geliştirilmiş ve ayrıca VG içermeyen bir referans (baz) konfigürasyon değerlendirilmiştir. Yapılan modifikasyonlar, yerel etkinin incelenebilmesi amacıyla yalnızca aracın sağ ön tarafına uygulanmıştır. İç gürültü ölçümleri, sağ tarafta oturan yolcuların kulak konumlarına yerleştirilen mikrofonlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Akustik verilerin yorumlanmasını desteklemek amacıyla, sağ ön kapı camının ön kısmına yerleştirilen iplik (tuft) dizileri ile akış görselleştirmesi yapılmıştır. Tuft davranışı, kabin içinden bir mobil kamera ile kaydedilmiş ve böylece akış yapıları ile akustik tepki arasında eş zamanlı ilişkilendirme sağlanmıştır. Tüm testler, kontrollü bir test pistinde sabit 120 km/s araç hızı altında gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, yerel akış kontrol elemanlarının türbülans karakteristikleri üzerindeki etkisini ve bunun iç gürültü seviyelerine yansımaları ortaya koymaktadır. Bulgular, A-sütunu ve ayna bölgesi çevresindeki aeroakustik mekanizmaların anlaşılmasına katkı sağlamakta ve girdap üreteçlerinin pasif bir gürültü azaltma yöntemi olarak potansiyelini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Aeroakustik, NVH, Girdap Üreteçleri, Rüzgâr Gürültüsü

Abstract

Aerodynamic noise remains a critical contributor to interior cabin comfort, particularly at highway speeds where flow-induced pressure fluctuations dominate. This study investigates the effect of vortex generators (VGs) on interior aero acoustic performance in the vicinity of the external mirror and A-pillar region of a passenger vehicle. Four different VG configurations were developed by strategically placing vortex generators around these regions, in addition to a baseline configuration without VGs. The modifications were applied exclusively to the front-right side of the vehicle to enable localized assessment. Interior noise measurements were conducted using microphones positioned at the ear locations of right-side occupants. To support the interpretation of acoustic data, flow visualization was performed using tuft grids attached to the front section of the front-right door glass. The tuft behavior was recorded from inside the cabin using a mobile camera, allowing

simultaneous correlation between flow structures and acoustic response. All tests were carried out on a controlled test track at a constant vehicle speed of 120 km/h. The results provide insight into how localized flow control devices influence turbulence characteristics and their subsequent impact on interior noise levels. The findings contribute to the understanding of aero acoustic mechanisms around the A-pillar and mirror region and demonstrate the potential of vortex generators as a passive noise mitigation strategy.

Keywords: Aeroacoustics, NVH, Vortex Generators, Wind Noise

INTRODUCTION

At highway speed, interior vehicle noise progressively shifts from powertrain- and tyre-dominated content to broadband aerodynamic noise, and this transition occurs even earlier in electrified vehicles because the masking effect of the engine is weaker (Zou et al., 2026). Among the most persistent source regions are the A-pillar, the exterior mirror and the front side-window area, where separated flow, vortex shedding and unsteady wake impingement produce fluctuating surface pressures close to the occupants' ears (Zou et al., 2026; Hartmann et al., 2012; Ali et al., 2018; Chode et al., 2023).

Mirror and A-pillar aeroacoustics have therefore been studied both on simplified bodies and on realistic generic vehicles. Hartmann et al. (2012) showed on a generic vehicle model that the side mirror and A-pillar dominate the side-window loading when structural transmission through the front side window is isolated. Ali et al. (2018) reached a similar conclusion on the DrivAer model, reporting that the A-pillar contribution can exceed the side-mirror contribution across the frequency range when the local flow becomes highly separated. More recent numerical work on squareback vehicles continues to identify mirror-induced vortices and A-pillar interactions as key generators of fluctuating pressure on the side glass (Chode et al., 2023; Zaareer et al., 2023).

Passive vortex generators are attractive in this context because they can energize the near-wall flow, redistribute vorticity and delay or soften separation without requiring active actuation. Lin's (2002) review of low-profile VGs established that their main role is to transfer momentum from the outer flow into the near-wall region, thereby improving boundary-layer resistance to adverse pressure gradients. In road-vehicle aeroacoustics, however, the benefit of a VG depends not only on whether it delays separation, but also on where the resulting vortical structures are convected. A device that weakens one separation line can still worsen noise if it redirects smaller-scale turbulence toward the side glass (Zou et al., 2026; Chode et al., 2023; Zaareer et al., 2023).

The present work focuses on that placement problem. Rather than optimizing mirror shape globally, the study isolates four compact VG layouts applied only on the front-right side of the vehicle and compares them with a non-VG baseline. The novelty lies in combining ear-position 1/3-octave measurements with simultaneous tuft visualization on the front-right door glass. This combination makes it possible to discuss not only which configuration is quieter, but also which flow mechanism most plausibly explains the measured spectral change.

EXPERIMENTAL SETUP

Test Conditions

All measurements were conducted on a test track under steady driving conditions at a constant vehicle speed of 120 km/h. This ensured consistent aerodynamic loading and repeatability of the measurements.

Acoustic Measurements

Interior noise measurements were performed using microphones positioned at the ear locations of right-side occupants. This placement enables localized assessment of aerodynamic noise originating from the side mirror and A-pillar region. The recorded data was processed in terms of:

- 1/3 octave band spectra
- A-weighted sound pressure levels (dB(A))
- steady-state averaged values

Flow Visualization

To support the interpretation of acoustic measurements, tuft-based flow visualization was employed. Tufts were attached to the front section of the front-right door glass in the vicinity of the side mirror. The tuft motion was recorded from inside the cabin using a mobile device during acoustic measurements.

It should be noted that this method provides qualitative information about flow behavior, including relative changes in flow unsteadiness and alignment, rather than detailed or quantitative flow structures.

Test Configurations

Five configurations were investigated:

Cfg.2 (Baseline): No vortex generators

Cfg.1: VGs on the upper trailing edge of the mirror skull cap

Cfg.3: Three VGs on the mirror flag vertical edge

Cfg.4: VGs applied along the A-pillar

Cfg.5: VGs aligned with the leading edge of the mirror skull cap

Representative photographs of the non-baseline arrangements are shown in Figure 1.



Figure 1. Physical placement of the add-on vortex generators for Cfg.1, Cfg.3, Cfg.4, and Cfg.5.

RESULTS AND DISCUSSION

Acoustic Results

The 1/3 octave band analysis reveals that the effect of vortex generators is strongly dependent on their placement. Figure 2 shows the measured A-weighted 1/3-octave spectra, and Figure 3 shows the spectral difference of each VG configuration relative to the baseline. The overall ranking is unambiguous: only Cfg.5 improves the cabin noise over the full set of octave bands on average, whereas Cfg.1, Cfg.3 and Cfg.4 all produce net penalties. The mean differences relative to the baseline are +0.51 dB(A) for Cfg.1, +0.43 dB(A) for Cfg.3, +0.61 dB(A) for Cfg.4 and -0.13 dB(A) for Cfg.5.

Among all configurations, Cfg.5 (leading edge application) provided the most consistent noise reduction relative to the baseline. The improvement is most evident in the mid-frequency range (approximately 800–2000 Hz), where reductions of up to approximately 0.6 dB(A) were observed. This frequency range is typically associated with flow-induced noise generated by mirror wake interaction with the side glass and A-pillar region.

In contrast, Cfg.4 (A-pillar application) resulted in a noticeable increase in interior noise levels, with peak increases reaching approximately 2.8 dB(A) in certain frequency bands. This indicates that modifications applied upstream of the mirror can adversely affect the flow conditions interacting with the mirror region.

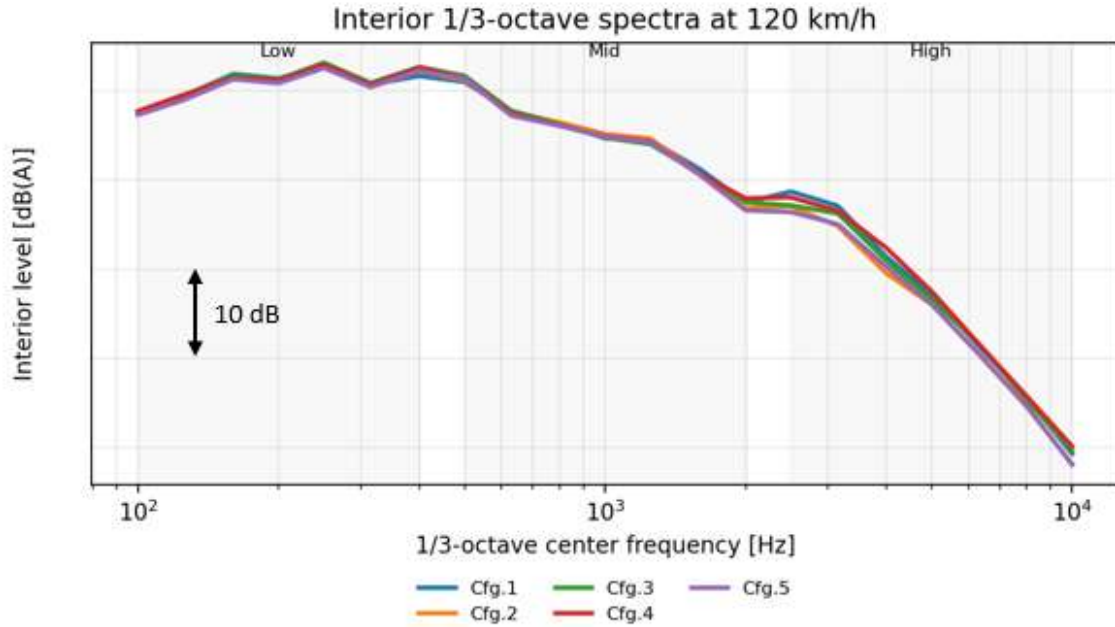


Figure 2. Interior A-weighted 1/3-octave spectra for all configurations at 120 km/h.

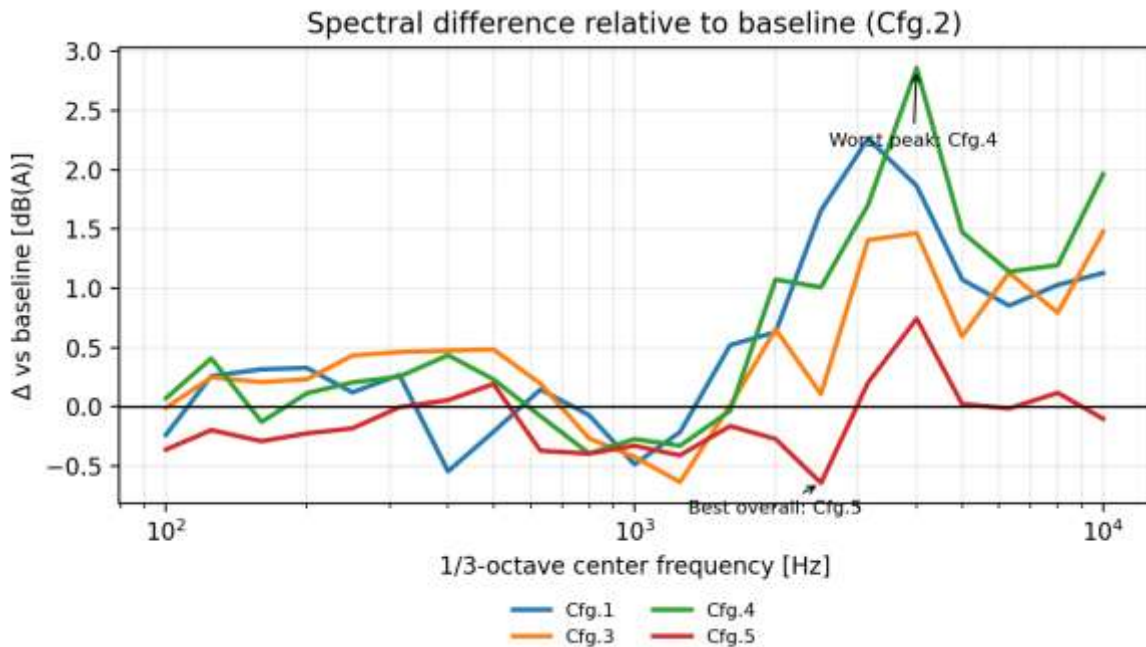


Figure 3. Spectral difference relative to the baseline (Cfg.2). Negative values indicate a reduction in cabin noise.

Cfg.3 (mirror flag application) exhibited mixed behavior, with some frequency bands showing reductions relative to the baseline and others showing slight increases. This suggests that localized modifications near the mirror support influence the acoustic response in a frequency-dependent manner. Similarly, Cfg.1 (trailing edge application) did not provide a consistent improvement. The results indicate that modifications applied after the primary separation region have limited influence on the dominant noise-generating mechanisms.

A compact statistical summary is given in Table 1. The low-frequency band (100–400 Hz) shows small absolute changes for all configurations, indicating that none of the layouts fundamentally altered the lowest-frequency window loading. The most relevant contrast appears in the mid band (500–2000 Hz), which is where the mirror/A-pillar interaction typically dominates the side-glass response [2–5]. In this band, Cfg.5 reduces the average level by 0.25 dB(A), while Cfg.1, Cfg.3 and Cfg.4 are effectively neutral to slightly positive. The strongest penalties occur above 2500 Hz: Cfg.1 rises by 1.41 dB(A) on average in the high band, Cfg.3 by 1.00 dB(A), and Cfg.4 by 1.62 dB(A), whereas Cfg.5 remains almost neutral (+0.05 dB(A)).

Table 1. Summary of spectral change relative to the baseline.

Config	Overall Δ	100–400 Hz	500–2000 Hz	2500–10000 Hz	Best band	Worst band
Cfg.1	+0.51	+0.07	+0.04	+1.41	–0.55 dB @ 400 Hz	+2.26 dB @ 3.15 kHz
Cfg.3	+0.43	+0.29	+0.00	+1.00	–0.64 dB @ 1.25 kHz	+1.48 dB @ 10 kHz
Cfg.4	+0.61	+0.19	+0.03	+1.62	–0.40 dB @ 800 Hz	+2.86 dB @ 4 kHz
Cfg.5	–0.13	–0.17	–0.25	+0.05	–0.64 dB @ 2.5 kHz	+0.74 dB @ 4 kHz

Cfg.5 is therefore the only arrangement that suppresses the dominant mid-band content without paying a high-frequency penalty. Its largest reductions occur between 630 and 2500 Hz, with notable negative differences at 800 Hz (–0.40 dB), 1000 Hz (–0.33 dB), 1250 Hz (–0.41 dB), 1600 Hz (–0.16 dB), 2000 Hz (–0.27 dB) and 2500 Hz (–0.64 dB). Cfg.1 and Cfg.3 each show isolated improvements around 800–1250 Hz, but those gains are offset by strong penalties in the upper bands. Cfg.4 is the most adverse configuration because its broad high-frequency rise starts earlier and peaks highest.

Qualitative Flow Observations

Flow visualization using tufts was used to support the interpretation of acoustic measurements. Figure 4 shows an instant extracted from the video recorded during the measurement run of Config1.



Figure 4. *Tuft motion pattern at an instant during the measurement of Config1.*

In the baseline configuration, tuft motion exhibited relatively high levels of fluctuation and spatial variability, indicating an unsteady flow field interacting with the side glass.

For Cfg.5, the tuft motion appeared comparatively more aligned and less erratic in certain regions, suggesting a reduction in large-scale unsteady flow behavior. This observation is consistent with the measured reduction in mid-frequency noise levels.

In contrast, Cfg.4 showed increased irregularity in tuft motion, including noticeable fluctuations in upstream regions. This indicates that the flow approaching the mirror may become more disturbed, which is consistent with the observed increase in interior noise levels.

For Cfg.3, the tuft behavior suggested localized changes in flow interaction patterns, although the overall level of unsteadiness remained comparable to the baseline in some regions. This aligns with mixed acoustic results.

Cfg.1 showed only minor differences compared to the baseline, supporting the conclusion that its influence on dominant flow structures is limited.

Flow–Acoustic Relationship

The combined analysis of acoustic data and qualitative flow observations suggests that the control of flow structures before or during the formation of the mirror wake is more effective than modifying the flow downstream of separation.

The improved performance of Cfg.5 can be attributed to its placement at the leading edge of the mirror, where it interacts with the incoming flow at an early stage. This likely reduces the intensity of unsteady flow structures that develop downstream.

On the other hand, the degraded performance observed in Cfg.4 indicates that introducing disturbances upstream of the mirror may amplify unsteady flow interactions, leading to increased acoustic excitation.

Configurations acting closer to or after the separation region (Cfg.1 and Cfg.3) appear to have limited or inconsistent influence, suggesting that the dominant noise-generating mechanisms are already established before these modifications can significantly affect them.

CONCLUSIONS

An experimental investigation was conducted to evaluate the influence of vortex generator placement on interior aeroacoustic noise in the A-pillar and side mirror regions.

The results demonstrate that:

- VG effectiveness is highly dependent on placement relative to dominant flow structures
- Leading-edge application (Cfg.5) provides the most consistent noise reduction
- A-pillar application (Cfg.4) can degrade aeroacoustic performance
- Downstream modifications (Cfg.1 and Cfg.3) have limited or inconsistent effects

Qualitative tuft visualization supports these findings by indicating relative differences in flow of unsteadiness and alignment between configurations.

Overall, the study highlights that early-stage flow conditioning is more effective than downstream flow modification, and that improper placement of passive devices may lead to adverse aeroacoustic effects.

REFERENCES

- Ali, M. S. M., Jaliasabri, J., Sood, A. M., Mansor, S., Shaharuddin, H., & Muhamad, S. (2018). Wind noise from A-pillar and side view mirror of a realistic generic car model, *DrivAer. International Journal of Vehicle Noise and Vibration*, 14(1), 38–61.
- Chode, K. K., Viswanathan, H., & Chow, K. (2021). Noise emitted from a generic side-view mirror with different aspect ratios and inclinations. *Physics of Fluids*, 33(8), 084105. <https://doi.org/10.1063/5.0057166>
- Chode, K. K., Viswanathan, H., Chow, K., & Reese, H. (2023). Investigating the aerodynamic drag and noise characteristics of a standard squareback vehicle with inclined side-view mirror configurations using a hybrid computational aeroacoustics approach. *Physics of Fluids*, 35(7), 075148. <https://doi.org/10.1063/5.0156111>
- Hartmann, M., Ocker, J., Lemke, T., Mutzke, A., Schwarz, V., Tokuno, H., Toppinga, R., Unterlechner, P., & Wickern, G. (2012). Wind noise caused by the side-mirror and A-pillar of a generic vehicle model. *AIAA Paper 2012-2205*. <https://doi.org/10.2514/6.2012-2205>
- Lin, J. C. (2002). Review of research on low-profile vortex generators to control boundary-layer separation. *Progress in Aerospace Sciences*, 38(4–5), 389–420.
- Zaareer, M. N., Mourad, A.-H. I., Darabseh, T., Abdullah, K., & ElSayed, M. S. A. (2023). Aeroacoustics wind noise optimization for vehicle's side mirror base. *International Journal of Thermofluids*, 18, 100332. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2023.100332>

Zou, T., Fu, Y., & Cao, P. (2026). Vehicle aerodynamic noise: A systematic review of mechanisms, simulation methods, and bio-inspired mitigation strategies. *Biomimetics*, 11(2), 99. <https://doi.org/10.3390/biomimetics11020099>

Influence of Weld Geometry and Process Variability on The Durability Performance of a Prototype Shock Absorber

Furkan Mahir TAŞATAN¹, Gürhan ALTINEL²

¹furkan.mahirtasatan@tofas.com.tr; Tofaş Türk Otomobil Fabrikası A.Ş. R&D Center, Bursa, Türkiye.

²gurhan.altinel@tofas.com.tr, Tofaş Türk Otomobil Fabrikası A.Ş. R&D Center, Bursa, Türkiye.

Özet

Dayanıklılık testleri, ürün geliştirme sürecinin erken aşamalarında süspansiyon bileşenlerindeki yapısal zayıflıkları belirlemek için kullanılan önemli bir doğrulama yöntemidir. Bu çalışmada, prototip bir amortisörün üst halka bağlantı bölgesine odaklanan bir geliştirme ve optimizasyon çalışması sunulmaktadır. Çalışmanın amacı, tasarım ve proses optimizasyonunun eş zamanlı uygulanmasıyla kaynaklı bağlantının dayanıklılık performansını iyileştirmektir. Bağlantı bölgesinin yapısal davranışını değerlendirmek amacıyla, temsili düşey dinamik yükleme koşulları altında kontrollü tezgâh testleri gerçekleştirilmiştir. Kaynak geometrisi ve birleştirme konfigürasyonu üzerinde parametrik incelemeler yapılmış ve üst halka kaynak bölgesinde hassasiyet olduğu belirlenmiştir. Bu sonuçlar hem tasarım hem de üretim parametrelerinde koordineli iyileştirmeler yapılması gerektiğini ortaya koymuştur. Tezgâh seviyesi değerlendirmelerden elde edilen bulgular doğrultusunda, bileşen tasarımı ve kaynak prosesi üzerinde iteratif değişiklikler uygulanmıştır. Geliştirme süreci sürekli olarak deneysel geri bildirimlerle desteklenmiş ve bağlantı bölgesindeki gerilme dağılımı ile dayanıklılık performansını etkileyen kritik faktörlerin belirlenmesine olanak sağlamıştır. Çalışma, tasarım özellikleri ile kaynak proses parametrelerinin birlikte optimize edilmesinin bağlantının yapısal dayanımını önemli ölçüde artırdığını göstermektedir. Tezgâh testlerinden elde edilen bilgi birikimini içeren nihai tasarım, temsili yükleme koşulları altında doğrulanmıştır. Sonuç olarak bu çalışma, tasarım ve üretim proseslerinin birlikte ele alınmasının önemini ortaya koymaktadır. Bileşen seviyesinde gerçekleştirilen tasarım ve proses iyileştirmeleri, araç seviyesi dayanıklılık testleri ile doğrulanmış ve bağlantı bölgesinin yapısal performansında önemli bir iyileşme sağlandığı gösterilmiştir. Çalışma, kaynaklı süspansiyon bileşenlerinde dayanıklılığın artırılmasına yönelik genel mühendislik yaklaşımları sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Amortisör, Dayanıklılık testi, Isıdan etkilenen bölge (HAZ), Kaynak geometrisi, Kaynaklı bağlantı, Proses değişkenliği, Prototipleme, Tasarım optimizasyonu, Üst halka bağlantısı, Yorulma performansı.

Abstract

Durability tests are an important validation method for identifying structural weaknesses of suspension components during the early stages of product development. In this study, a development and optimization activity focusing on the upper ring connection region of a prototype shock absorber is presented. The work aims to improve the durability performance of the welded joint through simultaneous design and process optimization. Controlled bench tests were conducted under

representative vertical dynamic loading conditions to evaluate the structural behavior of the joint. Parametric investigations were performed on the weld geometry and joining configuration, revealing sensitivity in the upper ring welding region. These results highlighted the need for coordinated improvements in both design and manufacturing parameters. Based on the findings from bench-level evaluations, iterative modifications were applied to the component design and welding process. The development process was continuously supported by experimental feedback, enabling the identification of critical factors affecting stress distribution and durability performance in the joint region. The study demonstrates that the combined optimization of design features and welding process parameters significantly improves the structural robustness of the connection. The final design, incorporating the acquired know-how from bench tests, was validated under representative loading conditions. In conclusion, this study demonstrates the importance of addressing design and manufacturing processes together. The design and process improvements made at component level were validated through vehicle level durability tests, confirming a significant enhancement in the structural performance of the joint region. The study provides general engineering insights for improving durability in welded suspension components.

Keywords: Shock absorber, Upper ring connection, Welded joint, Durability testing, Weld geometry, Heat-affected zone (HAZ), Process variability, Fatigue performance, Prototyping, Design optimization.

1. INTRODUCTION

The shock absorber is one of the mechanical components of the modern automotive suspension system subjected to structural loads (Dixon, 2007; Heibing & Ersoy, 2011). Beyond its primary hydraulic damping function, the damper transmits dynamic vertical, lateral, and longitudinal forces between the wheel and the vehicle body structure. The structural integrity of welded joint interfaces is therefore a critical determinant of vehicle durability and directly affects occupant safety in safety-relevant configurations such as MacPherson-type suspensions. Welded joint failures in suspension components are widely reported in the literature as one of the primary mechanisms of premature service life loss; the majority of reported cases are attributed not to a single root cause but to a combination of geometric design, weld process control, and loading conditions (Lee et al., 2005; Radaj et al., 2006).



Figure 1.1. *Prototype rear shock absorber upper ring geometry and welded connection region before durability testing.*



Figure 1.2. Typical loading path and stress concentration region around the upper ring weld termination area.

During prototype development phases, manufacturing processes are not yet fully optimized. Manual welding is frequently employed in early build samples, tooling is at a “proto” maturity level, and the production-representative configuration of process parameters has not yet been established. Under these conditions, welded joint failures may occur at exposure levels that would present no structural risk in fully validated series production components. The emergence of such failures in prototype testing does not necessarily indicate a fundamental design error; rather, it provides early-warning information that can be used to guide corrective engineering action before the transition to series production.

The upper mounting ring of the rear shock absorber, formed from a cold-drawn welded steel tube and joined to the piston rod assembly by a circumferential weld, is one of the most structurally demanding connection points of the damper. The ring carries the entire reaction load path from the rear suspension to the body mounting point. This load includes high-amplitude vertical loads from road events, lateral cornering loads transmitted through the suspension geometry, and longitudinal loads from braking and acceleration (Heibing & Ersoy, 2011). The cyclic loading at this interface, combined with the heat-affected zone (HAZ) produced by the welding process, creates conditions conducive to fatigue crack initiation when geometry is insufficient (Radaj et al., 2006). Durability validation of such assemblies is typically performed using 4-poster test rigs that reproduce road loads collected from prototype vehicles; these rigs apply vertical motion at four-wheel positions to reproduce the target damage equivalent of the full vehicle service life (Heuler & Klätschke, 2005).

This study presents the investigation of a prototype rear shock absorber upper ring fracture observed during a 4-poster body durability test, the root cause analysis conducted using a combination of mechanical, metallurgical, and numerical methods, and the design and process improvements applied across three successive maturity phases. The case is presented as a representative example of how prototype-phase weld failures should be addressed, considering the interaction between geometric design adequacy, weld process stability, and acceptance criterion adequacy, rather than focusing on a single factor.

2. TEST CONFIGURATION AND CASE DESCRIPTION

2.1 Test Configuration

A 4-poster body durability test was conducted in a climate-controlled environment to reproduce road loads measured during vehicle proving-ground campaigns on the damper assemblies. Damper assemblies were mounted in the nominal suspension configuration with all production-representative

mounting brackets, bushings, and torque values applied. Loading was applied exclusively in the vertical (Z) direction at each of the four-wheel positions; target displacement and acceleration time histories were derived from road load data acquisition (RLDA) measurements conducted on prototype vehicles. Peak wheel accelerations in the rebound and compression directions, the thermal envelope of the test, and compliance of the upper mounting torque values with requirements were verified during the test. The damper assemblies under evaluation are an early prototype production build. At this maturity level, the upper ring component was manufactured with a 4.0 mm wall thickness and joined to the piston rod assembly using a manual welding process. Bushings, welding electrodes, and assembly fixtures are also at a “proto” maturity level consistent with the early stage of the development program.



Figure 2.1. 4-poster durability test configuration used for reproducing representative vehicle road loads on suspension components.

2.2 Case Description

Separation of the rear left upper mounting ring occurred at approximately 20–21% of the total planned durability requirement. The fracture initiated at the weld bead termination zone and propagated circumferentially until complete detachment of the upper ring and bushing assembly from the damper rod. The shock absorber on the right side of the vehicle exhibited no comparable damage and remained intact throughout the post-event inspection period. No loss of integrity was observed in either of the two front axle assemblies.

As the upper ring separation did not immediately halt the test cycle, continued mechanical cycling caused secondary damage. The detached bushing was repeatedly struck by the cycling damper rod end; this resulted in local deformation of the bushing elastomer and abrasion of the metallic bushing shell. This secondary damage complicated the subsequent fracture surface analysis but did not obscure the primary fracture surface.

The macroscopic appearance of the fracture surface is indicative of cyclic crack initiation followed by overloading final separation. The crack initiation zone is confined to the vicinity of the weld termination region where the weld bead transitions back to the parent tube material. No evidence of base material defects, pronounced porosity, or weld line cracking was observed in the fusion zone itself. This

morphology directed attention at an early stage toward the geometric and metallurgical conditions at the weld termination rather than base material or fusion zone defects.

3. INVESTIGATION

3.1 Weld Penetration

The weld penetration acceptance criterion for the upper ring joint is defined in the component drawings as a minimum depth of 0.30 mm, derived from standard weld inspection practice. Penetration was measured on sectioned specimens using metallographic preparation: specimens were cut through the weld, mounted, polished, etched with an appropriate reagent to reveal the fusion boundary, and measured under a calibrated optical microscope. Penetration values measured on prototype build specimens range from approximately 0.464 to 0.589 mm. All measurements satisfy the 0.30 mm minimum acceptance threshold with a substantial margin. Measurements of the piston rod assembly welds similarly meet the 0.30 mm minimum acceptance criterion, with values typically reported in the range of 0.348 to 0.482 mm across production lots.

For completeness, acceptance criteria for adjacent welded joint interfaces within the damper assembly are also defined in the range of 0.45 to 0.60 mm. Measured values for these interfaces are compliant with their respective acceptance ranges across the specimens examined. This evidence redirected the investigation away from the simplest possible explanation toward more nuanced mechanisms such as heat input variability, geometric stress concentration at the weld termination, and the interaction of these factors with the available load-carrying wall thickness (Lee et al., 2005; Radaj et al., 2006).

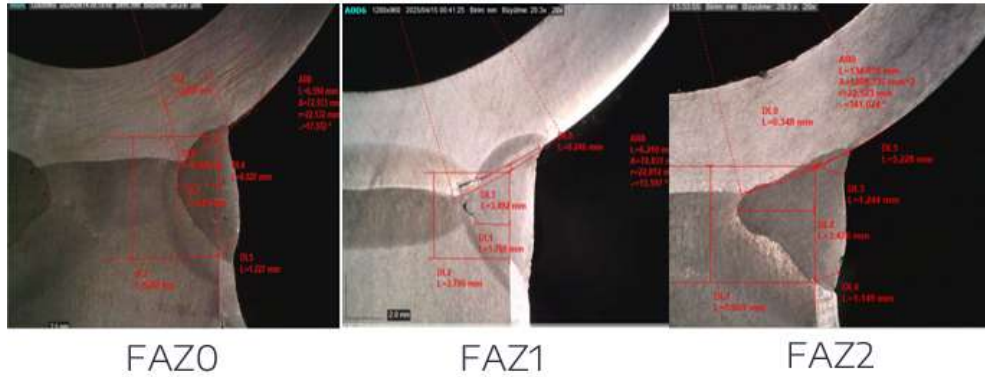


Figure 3.1. Metallographic cross-sectional view of the upper ring weld showing penetration depth and heat-affected zone (HAZ).

3.2 Hardness Analysis

Vickers' hardness measurements were performed on sectioned specimens across the weld fusion zone, heat-affected zone, and parent material in accordance with ISO 6507-1 (International Organization for Standardization [ISO], n.d.). Indentations were placed along defined traverses spanning the weld geometry, enabling comparison between the weld zone, the immediately adjacent HAZ, and unaffected parent material.

In prototype assemblies (4.0 mm wall, manual welding), measurements revealed that weld zone hardness and upper ring parent material hardness exhibit pronounced variability in thermal history arising from the inherent nature of manual welding. This thermal variability leads to locally inconsistent annealing of the cold-drawn parent tube and accounts for the observed hardness scatter.

Following the transition to robotic welding in Phase 1, hardness values stabilized, with a significantly narrower scatter band observed compared to Phase 0. This is a consequence of the more uniform and slightly reduced heat input characteristic of the controlled robotic process. The reduction in hardness of the parent ring material reflects more uniform local annealing rather than localized overheating.

The post-improvement condition is clearly visible in the maturity comparison: the wide hardness range associated with manual welding in Phase 0 contrasts with the significantly narrower distribution produced by the robotic process in Phase 1. This improvement in hardness control contributes positively to durability performance by reducing the local stress concentration potential at the weld termination. This thermal variability leads to locally inconsistent annealing of the cold-drawn parent tube and accounts for the observed hardness scatter.

3.3 Material Verification

The chemical composition of the upper ring material was verified against the material specification per EN 10305-2 and DIN 2393-1 (European Committee for Standardization [CEN], n.d.; Deutsches Institut für Normung [DIN], n.d.). Spectrometric analysis confirmed compliance within the permissible deviation ranges defined in the applicable standards for all controlled elements including aluminium, carbon, manganese, phosphorus, sulphur, and silicon. The carbon equivalent value (CEV) of the upper ring material was calculated using the standard formula:

$$CEV = C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Ni + Cu)/15$$

The calculated CEV is well below the 0.40 threshold commonly used to indicate the upper limit of weldability without preheating in low-alloy steels. This result confirms that the upper ring material is metallurgically suitable for welding under production-intent process conditions and does not require preheating to manage HAZ embrittlement. Material chemistry is therefore eliminated as a contributing root cause.

3.4 Tensile Testing

Piston rod assembly weld joints were evaluated for static tensile capacity against the minimum kgf acceptance criterion. Specimens were extracted from production-representative welded assemblies and tested under quasi-static displacement-controlled loading in a calibrated tensile testing machine (Lee et al., 2005).

All specimens tested in both Phase 0 and Phase 2 build configurations met the minimum criterion. However, the numerical comparison between phases revealed a pronounced improvement attributable to the combined geometric and process changes. The 34% improvement when comparing the ultimate tensile load of Phase 0 assemblies (4.0 mm wall thickness, manual welding) to Phase 2 assemblies (5.0

mm wall thickness, robotic welding with optimized parameters) represents the primary structural margin gain associated with maturity evolution and is discussed in greater detail in Section 5.

3.5 Finite Element Analysis

Finite element analyses (FEA) were performed to compare stress distributions between Phase 0 and Phase 2 upper ring geometries. Models were established using the validated suspension assembly configuration; loading scenarios were derived from durability test reproduction conditions and steady-state lateral and longitudinal vehicle manoeuvres.

The comparative FEA confirmed reduced peak stress at the critical weld termination location in Phase 2 geometry, consistent with the larger load-carrying cross-section. Stress concentration factors at the weld termination zone are reduced in the thicker-walled configuration, reflecting the more favourable geometric transition from the weld bead to the parent tube (Radaj et al., 2006).

A limitation of the present FEA work must be acknowledged: HAZ material property degradation was not incorporated into the models. Both Phase 0 and Phase 2 FEA used homogeneous parent material properties in the vicinity of the weld. In view of the hardness data discussed in Section 3.2, which explicitly demonstrates local property variation in the HAZ, the models may underestimate local stress amplification arising from material property gradients. Improving model fidelity through integration of experimentally measured HAZ property curves has been identified as a topic for future work.

3.6 Root Cause Assessment

Cause-and-effect analysis was performed using the fishbone (Ishikawa) approach. The material was eliminated due to compliant chemistry and acceptable CEV. Measurement was confirmed by calibrated penetration and hardness data. Temperature and humidity (environment) within the controlled rig facility are within specification. The remaining contributing factors were consolidated under two headings. First, the upper ring wall thickness in the prototype phase (4.0 mm), when combined with the geometric stress concentration inherent to the weld termination zone, provides a smaller load-carrying cross-section than optimal for worst-case durability loading. Second, manual welding produces inherent variability in heat input, weld bead geometry, and the resulting HAZ extent and properties, as directly evidenced by the hardness data in Section 3.2.

Fracture surface examination of more than five separated specimens confirmed that crack initiation occurred at the weld termination zone rather than along the weld line. This morphology is consistent with the combined geometric–metallurgical root cause: the weld termination acts as a notch-like stress concentrator, and the variable HAZ properties produced by manual welding amplify the local stress response, reducing local fatigue resistance below the level required to sustain the planned exposure.

4. DESIGN AND PROCESS MATURITY EVOLUTION

The component evolved across three defined maturity phases. Phase 0 (prototype build) uses a 4.0 mm upper ring wall thickness with a manual welding process and corresponds to the failure event under investigation. Phase 1 (intermediate maturity) retained the transitional geometry but introduced robotic welding to establish process stability. Phase 2 (production-oriented maturity) combines the 5.0

mm wall thickness with optimized robotic welding parameters and is the configuration in which the durability retest was conducted.

In Phase 0, the upper ring was manufactured with a 4.0 mm wall thickness and joined by a manual welding process. Weld stability, together with the heat input variability directly visible in the hardness scatter discussed in Section 3.2, was retrospectively identified as insufficient for worst-case durability loading. The failure event under investigation occurred at Phase 0 maturity.

In Phase 1, robotic welding was introduced to replace the manual process. The primary motivation is to improve parameter repeatability: the robotic process holds welding current, voltage, travel speed, and torch geometry within tight tolerances for every weld, eliminating the operator-to-operator and pass-to-pass variability inherent in manual welding. Hardness data obtained on Phase 1 specimens confirmed the expected stabilisation, with both reduced mean hardness and significantly reduced scatter in the weld zone and parent material.

In Phase 2, the upper ring wall thickness increased from 4.0 mm to 5.0 mm, and the robotic welding parameters were frozen and optimized for the new geometry. Penetration depth was deliberately set to remain within defined acceptance limits while maintaining process stability; in particular, penetration depth was managed to avoid excess heat input that could enlarge the HAZ or weaken the parent tube wall. DFMEA and PFMEA documentation was updated to reflect the geometric and process changes; new control plans were defined for the robotic welding operation including weld parameter freeze, periodic process capability monitoring, and incoming inspection of welded sub-assemblies.

5. RESULTS AND DISCUSSION

When experimental work, material characterisation, and numerical analyses are evaluated together, the failure mechanism observed in the prototype phase and the effect of the improvements made are established consistently.

The failure observed during the 4-poster durability test occurred at approximately 20–21% of the targeted durability life. Fracture surface examinations clearly showed that crack initiation occurred at the weld termination zone rather than at the weld fusion zone. This demonstrates that the failure mechanism is not directly related to classical weld defects (lack of penetration, porosity, etc.) but is instead associated with local stress concentration and material property changes in the heat-affected zone (HAZ).

Metallurgical investigations showed that weld penetration values in all specimens were above the established minimum acceptance criteria. Consequently, insufficient penetration was eliminated as a root cause. Similarly, material verification work confirmed that the chemical composition is compliant with standards and that the carbon equivalent value is within the safe range for weldability. Material-induced embrittlement or non-conformance was therefore also not considered among the primary causes.

Hardness measurements revealed the most critical difference between manual and robotic welding processes. In Phase 0 (manual welding) specimens, a wide distribution of hardness was observed across

the weld zone and HAZ. This is a consequence of the variable heat input associated with manual welding and leads to inconsistencies in local microstructure and mechanical properties. This heterogeneous structure adversely affects fatigue resistance by amplifying local stress concentrations under cyclic loading. In contrast, with the transition to robotic welding (Phase 1 and Phase 2), the hard distribution narrowed markedly, and a more homogeneous structure was obtained.

The effect of the geometric improvement was confirmed by both experimental results and finite element analysis (FEA). Increasing the upper ring wall thickness from 4.0 mm to 5.0 mm reduced maximum stress at the critical weld termination zone. FEA results show a more balanced stress distribution and a lower stress concentration factor in Phase 2 geometry. Although the HAZ material gradient was not considered in the model, the inter-phase comparison clearly demonstrates the effect of geometric improvement.

Static tensile tests also support the effectiveness of the improvements made. In the Phase 2 configuration, approximately 34% higher tensile strength was achieved compared to Phase 0. This increase reflects the combined effect of the increase in cross-sectional areas and the improvement in process stability.

At the system level, the Phase 2 configuration was successfully validated under representative durability loads. No crack initiation or structural degradation was observed in the upper ring region during durability testing. This result demonstrates that the design and process improvements applied effectively eliminated the critical failure mechanism identified in the prototype phase.

Overall, the results clearly demonstrate that durability performance in welded suspension components is not dependent on a single parameter; geometric design, weld process stability, and HAZ material behaviour must be addressed together.

6. CONCLUSION

In this study, a fatigue-induced failure observed in the welded joint of a prototype rear shock absorber upper ring has been examined in detail, and design and process improvements developed based on root cause analysis are presented.

As a result of the investigation, it was determined that the failure originates from the combined effect of geometric stress concentration at the weld termination zone and HAZ property variability associated with manual welding. Weld penetration and material chemistry were found to be compliant and were therefore eliminated as root causes.

Within the three-phase development approach, process repeatability was increased and variability in heat input was reduced by transitioning from manual to robotic welding in the manufacturing process. In addition, stress levels in the critical zone were reduced and load-carrying capacity was improved by increasing the upper ring wall thickness.

The experimental tests and numerical analyses performed clearly demonstrated the effectiveness of these improvements. The final design was successfully validated under representative durability loads and achieved the targeted durability performance.

The most important output of this study is the demonstration that in fatigue-critical welded structures, design and manufacturing processes must be addressed not independently but through an integrated systems approach. Failures emerging in the prototype phase should not be evaluated merely as a design problem; they should be treated as critical feedback regarding the system as a whole. The findings obtained provide general engineering insights for improving durability performance in welded suspension components and are of guiding value for similar development processes.

REFERENCES

- Dixon, J. C. (2007). *The shock absorber handbook* (2nd ed.). Chichester, England: Wiley.
- Deutsches Institut für Normung. (n.d.). *DIN 2393-1: Welded precision steel tubes – Part 1: Technical delivery conditions*. Berlin, Germany: DIN.
- European Committee for Standardization. (n.d.). *EN 10305-2: Steel tubes for precision applications – Part 2: Welded cold drawn tubes*. Brussels, Belgium: CEN.
- Heibing, B., & Ersoy, M. (2011). *Chassis handbook: Fundamentals, driving dynamics, components, mechatronics, perspectives*. Wiesbaden, Germany: Vieweg+Teubner.
- Heuler, P., & Klätschke, H. (2005). Generation and use of standardised load spectra and load-time histories. *International Journal of Fatigue*, 27(8), 974–990.
- International Organization for Standardization. (n.d.). *ISO 6507-1: Metallic materials – Vickers hardness test – Part 1: Test method*. Geneva, Switzerland: ISO.
- Lee, Y. L., Pan, J., Hathaway, R. B., & Barkey, M. E. (2005). *Fatigue testing and analysis: Theory and practice*. Oxford, England: Butterworth-Heinemann.
- Radaj, D., Sonsino, C. M., & Fricke, W. (2006). *Fatigue assessment of welded joints by local approaches* (2nd ed.). Cambridge, England: Woodhead Publishing.

Kurşun-Asit Akülerde Derin Öğrenme Tabanlı Performans Değerlendirmesi

Meltem SÜPÜRTÜLÜ¹, Ersen YILMAZ²

¹E-mail: meltem.supurtulu@tofas.com.tr; TOFAŞ AR&GE Merkezi, Türk Otomobil Fabrikası, Bursa/Türkiye, ORCID: 0000-0003-0473-7731.

²E-mail: ersen@uludag.edu.tr; Bursa Uludağ Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Bursa/Türkiye, ORCID: 0000-0002-6620-655X.

Özet

Kurşun-asit aküler, düşük maliyetleri ve güvenilirlikleri sayesinde otomotiv ve endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu akülerin performans değerlendirilmesi, farklı çalışma koşullarını temsil eden çeşitli test prosedürleri ile gerçekleştirilmektedir. Bu kapsamda, akü davranışının detaylı analizine olanak sağlayan Derin Deşarj testleri önemli bir yer tutmaktadır. Bununla birlikte, bu testlerin uygulanması uzun süreli ölçüm süreçleri gerektirebilmektedir. Bu çalışmada, akülerin ileri döngü davranışını erken döngü verileri üzerinden tahmin etmeye yönelik veri temelli bir yöntem geliştirilmiştir. Bu kapsamda, Uzun Kısa Süreli Bellek (LSTM, Long Short-Term Memory), Geçitli Tekrarlayan Birim (GRU, Gated Recurrent Unit) ve Çift Yönlü Uzun Kısa Süreli Bellek (BiLSTM, Bidirectional Long Short-Term Memory)) tabanlı derin öğrenme modellerinin performansları, öznitelik bazlı dikkat mekanizmasının etkisi dikkate alınarak karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Tüm modeller, karşılaştırmaların tutarlılığını sağlamak amacıyla aynı veri seti, aynı öznitelik yapısı ve aynı ön işleme adımları kullanılarak eğitilmiştir. Model başarımı MSE ve R² metrikleri üzerinden değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, dikkat mekanizmasının modele dahil edilmesiyle birlikte daha bilgilendirici özniteliklerin öne çıktığını ve bunun tahmin doğruluğunu olumlu yönde etkilediğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Derin deşarj, Derin öğrenme, Dikkat mekanizmaları, Kurşun-asit aküler, LSTM.

Abstract

Lead-acid batteries are extensively employed in automotive and industrial applications owing to their cost-effectiveness and operational reliability. The evaluation of their performance is typically carried out through a range of test procedures designed to represent different operating conditions. Among these, Depth of Discharge tests play a significant role by enabling a detailed assessment of battery behavior. However, conducting such tests often involves extended measurement durations. This study presents a data-driven framework aimed at estimating future-cycle battery performance by leveraging information extracted from early-cycle data. Within this context, the predictive capabilities of LSTM, GRU, and BiLSTM architectures are comparatively examined, with particular emphasis on the integration of a feature-level attention mechanism. To ensure consistency in evaluation, all models

are trained under identical conditions using the same dataset, feature representation, and preprocessing pipeline. The performance of the proposed models is assessed using MSE and R^2 metrics. The findings suggest that incorporating attention mechanisms enables the models to better prioritize informative features, leading to improved predictive accuracy.

Keywords: Attention Mechanism, Depth of Discharge, Deep Learning, Lead-acid batteries, LSTM.

GİRİŞ

Enerji depolama sistemleri, modern otomotiv ve endüstriyel uygulamaların temel bileşenlerinden biri haline gelmiştir. Bu kapsamda, kurşun-asit aküler düşük maliyetleri, yüksek geri dönüştürülebilirlikleri ve güvenilirlikleri sayesinde 12V otomotiv sistemleri ve kesintisiz güç kaynaklarında yaygın olarak kullanılmaya devam etmektedir (Ng vd., 2021). Bununla birlikte, artan enerji verimliliği gereksinimleri, start-stop sistemleri ve rejeneratif frenleme gibi uygulamalar, bu akülerden beklenen performans kriterlerini daha da artırmıştır. Bu durum, akülerin yalnızca kapasite açısından değil, aynı zamanda dinamik davranışları ve yaşlanma karakteristikleri açısından da daha detaylı analiz edilmesini gerekli kılmaktadır (Bauknecht vd., 2022).

Kurşun-asit akülerde yaşlanma süreci; sülfatlaşma, elektrot korozyonu, aktif malzeme kaybı ve elektrolit stratifikasyonu gibi birbirine bağlı ve karmaşık mekanizmalar sonucunda gerçekleşmektedir (Ng vd., 2021). Bu süreç, kapasite kaybı ve iç direnç artışı ile karakterize olup, özellikle kısmi şarj durumunda çalışan otomotiv uygulamalarında daha belirgin hale gelmektedir. Bu nedenle, akü sağlığının doğru şekilde tahmin edilmesi, hem güvenlik hem de maliyet açısından kritik öneme sahiptir.

Akü performansının değerlendirilmesi, farklı çalışma koşullarını temsil eden çeşitli test prosedürleri ile gerçekleştirilmektedir. Bu kapsamda, akü davranışının detaylı analizine olanak sağlayan Derin Deşarj (DoD, Depth of Discharge) testleri önemli bir yer tutmaktadır. Bununla birlikte, bu testlerin uygulanması uzun süreli ölçüm süreçleri gerektirebilmektedir.

Geleneksel akü sağlık tahmin yöntemleri genellikle fizik tabanlı modelleme veya doğrudan ölçüm tekniklerine dayanmaktadır. Ancak bu yöntemler, karmaşık parametre ayarları gerektirmeleri ve değişken çalışma koşullarına karşı sınırlı esneklik sunmaları nedeniyle pratik uygulamalarda bazı kısıtlar içermektedir (Ng vd., 2021). Bu sınırlamalar, son yıllarda veri odaklı yaklaşımların ve özellikle makine öğrenmesi ile derin öğrenme yöntemlerinin ön plana çıkmasına neden olmuştur. Zaman serisi verilerinden doğrusal olmayan ilişkileri öğrenebilme yeteneği sayesinde derin öğrenme modelleri, akü degradasyon süreçlerinin modellenmesinde önemli avantajlar sunmaktadır (Cortes ve Cortes, 2016).

Literatürde, kurşun-asit aküler için derin öğrenme temelli çalışmaların sınırlı olduğu, ancak son yıllarda bu alana olan ilginin arttığı görülmektedir. Mevcut çalışmaların önemli bir kısmı sınırlı veri setleri üzerinde gerçekleştirilmiş veya belirli öznelite gruplarına odaklanmıştır. Bununla birlikte, akü

bozunmasının çok boyutlu ve doğrusal olmayan yapısı dikkate alındığında, tek bir veri alanına dayalı yaklaşımların yeterli olmadığı anlaşılmaktadır. Bu bağlamda, erken döngü verileri kullanılarak akü performansının tahmin edilmesi, test süreçlerinin daha etkin değerlendirilmesi ve erken karar destek mekanizmalarının geliştirilmesi açısından önemli bir araştırma alanı olarak öne çıkmaktadır.

Bu çalışmada, kurşun-asit akülerde gerçekleştirilen DoD testlerinin erken aşamada tahmin edilmesine yönelik veri odaklı bir yaklaşım sunulmuştur. Bu kapsamda, çok alanlı öznitelik çıkarımı, hibrit öznitelik seçimi ve öznitelik bazlı dikkat mekanizması (FLA, Feature-level attention) tabanlı derin öğrenme mimarileri birlikte kullanılmıştır. Ayrıca, Uzun Kısa Süreli Bellek (LSTM, Long Short-Term Memory), Geçitli Tekrarlayan Birim (GRU, Gated Recurrent Unit) ve Çift Yönlü Uzun Kısa Süreli Bellek (BiLSTM, Bidirectional Long Short-Term Memory) mimarilerinin performansı, dikkat mekanizmasının modele olan katkısı açısından karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada, 12V kurşun-asit akülerde gerçekleştirilen DoD testlerinin erken aşamada tahmin edilmesine yönelik veri odaklı bir yaklaşım geliştirilmiştir. Önerilen metodoloji; veri toplama, veri ön işleme, çok alanlı öznitelik çıkarımı, öznitelik seçimi ve derin öğrenme tabanlı modelleme adımlarından oluşmaktadır.

Veri seti, otomotiv uygulamalarına yönelik ticari kurşun-asit aküler üzerinde gerçekleştirilen döngüsel DoD testlerinden elde edilmiştir. Testler, kontrollü laboratuvar koşullarında ve standart test prosedürlerine uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Her bir akü için gerilim, akım ve sıcaklık verileri zaman serisi formatında kaydedilmiştir.

Ham veriler, model eğitime uygun hale getirilmeden önce çeşitli ön işleme adımlarından geçirilmiştir. Bu kapsamda ölçüm hataları ve gürültü içeren veriler temizlenmiş, aykırı değerler filtrelenmiş, veri zaman ekseninde hizalanmış ve gerekli durumlarda yeniden örnekleme işlemleri uygulanmıştır. Bu işlemler, veri kalitesini artırmak ve modelin genelleme kabiliyetini iyileştirmek amacıyla gerçekleştirilmiştir.

Akü bozunma davranışını daha kapsamlı temsil edebilmek amacıyla çok alanlı öznitelik çıkarımı yaklaşımı benimsenmiştir. Bu kapsamda, zaman alanından elde edilen istatistiksel öznitelikler (ortalama, varyans, standart sapma, çarpıklık, basıklık), frekans alanından elde edilen spektral öznitelikler (temel frekans, medyan frekans, spektral entropi) ve kaotik alanını temsil eden öznitelikler (Hurst üssü, detrended fluctuation analysis, Lyapunov üssü ve korelasyon boyutu) birlikte kullanılmıştır (Süptürülü ve Yılmaz, 2026). Her bir sinyal bileşeni için elde edilen öznitelikler birleştirilerek model girdisini oluşturan çok boyutlu bir özellik uzayı elde edilmiştir. Bu yaklaşım, akü bozunmasının doğrusal olmayan ve karmaşık yapısını daha etkin şekilde temsil etmeyi amaçlamaktadır.

Elde edilen özniteliklerin tamamının modele doğrudan verilmesi yerine, model performansını artırmak ve hesaplama maliyetini azaltmak amacıyla hibrit bir öznitelik seçimi yöntemi uygulanmıştır. Bu yöntemde, karşılıklı bilgi (MI, Mutual Information) tabanlı filtreleme yaklaşımı ile hedef değişken ile en yüksek bağımlılığa sahip öznitelikler belirlenmiş, ardından Rastgele Orman (RF, Random Forest) tabanlı önem sıralaması ile bu öznitelikler yeniden değerlendirilmiştir. Bu iki yöntemin birlikte

kullanılmasıyla gereksiz veya yüksek korelasyonlu öznitelikler elimine edilerek daha kompakt ve temsil gücü yüksek bir öznitelik alt kümesi elde edilmiştir (Süpürtülü vd., 2025).

Zaman serisi verilerin modellenmesi amacıyla tekrarlayan sinir ağları (RNN, Recurrent Neural Networks) tabanlı derin öğrenme mimarileri kullanılmıştır. Bu kapsamda, Uzun Kısa Süreli Bellek (LSTM), Geçitli Tekrarlayan Birim (GRU) ve Çift Yönlü Uzun Kısa Süreli Bellek (BiLSTM) mimarileri değerlendirilmiş; ayrıca öznitelik bazlı dikkat mekanizması (feature-level attention) ile desteklenen modeller incelenmiştir. Model, geçmiş döngü verilerini kullanarak akünün gelecekteki performansını tahmin edecek şekilde eğitilmiştir. Veri seti, eğitim, doğrulama ve test alt kümelerine ayrılarak modelin genelleme performansı analiz edilmiştir. Çalışmanın temel yaklaşımı, test sürecinin erken aşamalarına ait verileri kullanarak ileri döngü performansının tahmin edilmesine dayanmaktadır.

Model performansı, Ortalama Kare Hata (MSE, Mean Squared Error) ve Belirleme Katsayısı (R^2 , Coefficient of Determination) metrikleri kullanılarak değerlendirilmiştir. MSE ve R^2 metrikleri sırasıyla Denklem (1) ve Denklem (2)'de verilmiştir. R^2 değerinin 1'e yaklaşması, modelin veri üzerindeki açıklayıcılık düzeyinin yüksek olduğunu göstermektedir.

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - y_i)^2 \quad (1)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_i (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_i (y_i - \bar{y})^2} \quad (2)$$

Burada y_i gerçek değerleri, $\hat{y}_i$ model tahminlerini ve $\bar{y}$ gerçek değerlerin ortalamasını ifade etmektedir.

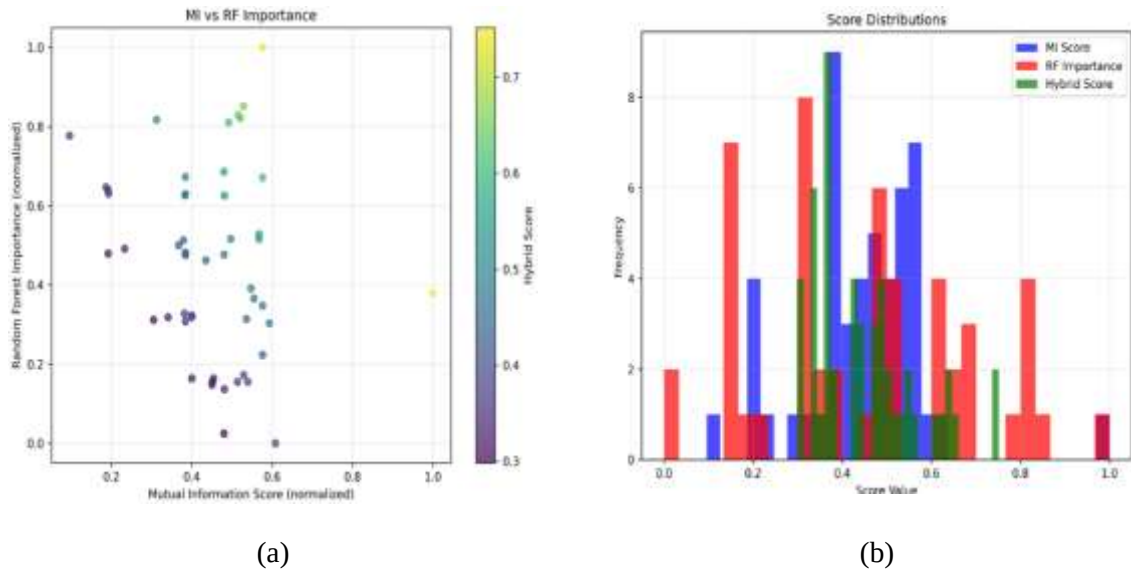
BULGULAR

Bu bölümde, önerilen yaklaşımların performansı, çok alanlı öznitelik çıkarımı, hibrit öznitelik seçimi ve farklı derin öğrenme mimarileri üzerinden gerçekleştirilen analizler ile değerlendirilmiştir.

Çok Alanlı Öznitelik Çıkarımı: Elde edilen öznitelikler, her bir döngü için çok boyutlu bir özellik vektörü olarak temsil edilmiştir. Bu kapsamda, zaman domeninden elde edilen istatistiksel özellikler, frekans domeninden elde edilen spektral özellikler ve sinyal davranışını temsil eden türevsel ve dağılımsal metrikler birlikte kullanılmıştır. Gerilim, akım ve sıcaklık sinyallerinden türetilen bu öznitelikler, sistem davranışını çok boyutlu olarak temsil eden bir özellik uzayı oluşturmuştur.

Oluşturulan öznitelik vektörleri, zaman serisi yapısı korunacak şekilde modele giriş olarak verilmiştir. Bu doğrultuda, her bir örnek belirli sayıda ardışık döngüye ait özniteliklerden oluşan bir pencere yapısı ile temsil edilmiştir. Böylece modelin, geçmiş döngü bilgilerini kullanarak gelecekteki performansı tahmin edebildiği gözlemlenmiştir. Farklı alanları kapsayan öznitelik yapısının, akü bozunmasına ait doğrusal olmayan ve karmaşık örüntülerin öğrenilmesini desteklediği görülmüştür.

Öznitelik Seçimi: Öznitelik seçimi sürecine ait skor dağılımları ve önem ilişkileri incelendiğinde, seçilen özniteliklerin hem karşılıklı bilgi (MI) hem de Rastgele Orman (RF) tabanlı önem ölçütlerine göre dengeli bir dağılım sergilediği görülmektedir. Şekil 1(a), özniteliklerin yalnızca tek bir kritere göre değil, her iki yaklaşım açısından birlikte değerlendirildiğini göstermektedir. Şekil 1(b)'de verilen dağılımlar incelendiğinde ise hibrit skor yaklaşımının daha ayırıştırıcı ve dengeli bir yapı sunduğu anlaşılmaktadır. Bu bulgular, hibrit öznitelik seçimi yaklaşımının daha anlamlı ve temsil gücü yüksek bir öznitelik alt kümesi oluşturduğunu ve model performansını desteklediğini göstermektedir.



Şekil 1. Öznitelik seçimi sürecine ait skor dağılımları. (a) MI ve RF önem skorlarının karşılaştırılması, (b) farklı skorların dağılımı.

Model Karşılaştırmaları: Önerilen yaklaşımın performansı, toplam 26 akü örneğinden oluşan veri seti üzerinde değerlendirilmiştir. Veri seti eğitim (14 akü), test (7 akü) ve doğrulama (5 akü) alt kümelerine ayrılmıştır. Farklı model mimarilerinin karşılaştırılması sonucunda, model yapısının tahmin performansı üzerinde belirgin bir etkisi olduğu gözlemlenmiştir. Model performansları Tablo 1’de sunulmuştur.

Öznitelik bazlı dikkat mekanizması içermeyen modeller incelendiğinde, LSTM ve GRU tabanlı yapıların kullanılan öznitelik setine bağlı olarak orta seviyede performans sergilediği görülmektedir ($R^2 \approx 0.56-0.86$). BiLSTM modelinin ise tüm öznitelikler ile daha düşük performans gösterdiği, ancak öznitelik seçimi sonrasında performansında iyileşme olduğu gözlemlenmiştir. Öznitelik bazlı dikkat mekanizması ile desteklenen modellerde ise daha yüksek doğruluk değerleri elde edilmiştir. LSTM ve GRU tabanlı modeller dikkat mekanizması ile birlikte daha yüksek performans sergilerken, BiLSTM yapısının bu mekanizma ile birlikte en yüksek R^2 değerine ulaştığı görülmüştür ($R^2 = 0.997$).

Öznitelik seçiminin model performansı üzerindeki etkisi incelendiğinde, seçilmiş öznitelikler ile daha tutarlı ve kararlı tahmin sonuçları elde edildiği gözlemlenmiştir. Ortalama hata değerlerinde düşüş

gözlemlenmiş olup, bu durum daha kompakt ve temsil gücü yüksek öznitelik setlerinin model performansını desteklediğini göstermektedir.

Elde edilen bulgular, akü bozunma sürecinde bazı özniteliklerin diğerlerine kıyasla daha fazla bilgi içerdiğini ve dikkat mekanizmasının bu öznitelikleri ağırlıklandırarak model çıktısını etkilediğini göstermektedir. Ayrıca, önerilen yaklaşımın test sürecinin erken aşamalarında anlamlı tahminler üretebildiği gözlemlenmiştir.

Tablo 1. Model Performans Karşılaştırması

Model	Öznitelik Seti	MSE	R ²
LSTM	Tüm Öznitelikler	0.0952	0.8652
	Seçilen Öznitelikler	0.1389	0.8033
GRU	Tüm Öznitelikler	0.2803	0.6031
	Seçilen Öznitelikler	0.3076	0.5644
BiLSTM	Tüm Öznitelikler	1.0863	0.5385
	Seçilen Öznitelikler	0.1112	0.8425
LSTM + FLA	Tüm Öznitelikler	0.0052	0.9927
	Seçilen Öznitelikler	0.0060	0.9915
GRU + FLA	Tüm Öznitelikler	0.0289	0.9591
	Seçilen Öznitelikler	0.0066	0.9907
BiLSTM + FLA	Tüm Öznitelikler	0.0059	0.9917
	Seçilen Öznitelikler	0.0334	0.9970

TARTIŞMA

Bu çalışmada elde edilen bulgular, çok alanlı öznitelik çıkarımı ve hibrit öznitelik seçimi yaklaşımının, akü bozunma sürecinin modellenmesinde bir temsil sağladığını göstermektedir. Farklı alanlardan elde edilen özniteliklerin birlikte kullanılması, sistem davranışının daha kapsamlı şekilde ifade edilmesine olanak tanımıştır. Model karşılaştırmaları incelendiğinde, öznitelik bazlı dikkat mekanizmasının farklı derin öğrenme mimarileri üzerinde benzer yönde etkiler oluşturduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, dikkat mekanizmasının modele entegre edilmesinin, özniteliklerin göreceli önemini dengeleyerek model çıktısını etkilediğini göstermektedir. Özellikle bazı özniteliklerin diğerlerine kıyasla daha fazla bilgi içerdiği ve bu özniteliklerin ağırlıklandırılmasının model performansını desteklediği değerlendirilmektedir. Öznitelik seçimi sonuçları, daha kompakt ve temsil gücü yüksek öznitelik setlerinin model performansı açısından daha kararlı sonuçlar üretebildiğini ortaya koymaktadır. Bu durum, yüksek boyutlu veri yapılarında gereksiz veya düşük katkılı özniteliklerin elenmesinin, modelin genelleme kabiliyeti üzerinde olumlu etkiler oluşturabileceğine işaret etmektedir. Bununla birlikte, çalışmada kullanılan veri setinin sınırlı sayıda akü örneği içermesi ve kontrollü test koşullarında elde edilmiş olması, sonuçların genellenebilirliği açısından bir kısıt oluşturmaktadır. Bu nedenle, farklı kullanım senaryoları ve daha heterojen veri setleri ile gerçekleştirilecek çalışmaların, önerilen yaklaşımın farklı koşullar altındaki performansını değerlendirmek açısından önemli katkılar sağlayacağı düşünülmektedir.

SONUÇ

Bu çalışmada, kurşun-asit akülerde gerçekleştirilen Derin Deşarj (DoD) testlerinin erken aşamada tahmin edilmesine yönelik veri odaklı bir yaklaşım sunulmuştur. Önerilen yöntem, çok alanlı öznitelik çıkarımı, hibrit öznitelik seçimi ve öznitelik bazlı dikkat mekanizması ile desteklenen derin öğrenme modellerinin birlikte kullanımına dayanmaktadır. Elde edilen sonuçlar, model mimarisi ve öznitelik seçiminin tahmin performansı üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca, dikkat mekanizması ile desteklenen modellerin daha yüksek doğruluk sağladığı ve önerilen yaklaşımın erken döngü verileri üzerinden anlamlı tahminler üretebildiği gözlemlenmiştir.

Gelecek çalışmalarda, önerilen yaklaşımın daha heterojen veri setleri ve farklı kullanım senaryoları üzerinde test edilmesi planlanmaktadır. Ayrıca, öznitelik bazlı dikkat mekanizmasının daha gelişmiş mimariler ile genişletilmesi, özellikle çoklu dikkat yapıları ve transformer tabanlı modeller ile desteklenmesi, modelin öğrenme kapasitesini artırabilecek potansiyel araştırma alanları arasında yer almaktadır. Bununla birlikte, öznitelik çıkarımı sürecinin otomatikleştirilmesi ve öğrenme tabanlı temsil yöntemlerinin kullanılması, modelin farklı veri setlerine uyarlanabilirliğini artırabilir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, TÜBİTAK BİDEB 2244 Sanayi Doktora Programı kapsamında, 118C083 (M.S.) numaralı “Geleceğin Otomobilleri için Rekabetçi Tasarım ve Malzeme Geliştirme Girdilerinin İleri Teknoloji Uygulamaları ile Geliştirilmesi” başlıklı proje tarafından desteklenmiştir. Yazar, sağladıkları desteklerden dolayı TÜBİTAK’a, Bursa Uludağ Üniversitesi’ne ve TOFAŞ Ar-Ge Merkezi’ne teşekkür etmektedir.

Kaynakça

- Bauknecht, S., Kowal, J., Bozkaya, B., Settelein, J., & Karden, E. (2022). The influence of cell size on dynamic charge acceptance tests in laboratory lead-acid cells. *Energy Technology*, 10, 2101053.
- Cortes, C. A., & Cortes, C. (2016). State of health estimation of VRLA batteries using nonlinear autoregressive neural networks with exogenous inputs. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 63(6), 3875–3884.
- Ng, K. S., Moo, C. S., Chen, Y. P., & Hsieh, Y. C. (2021). State-of-health estimation of lead-acid batteries: A review. *Applied Energy*, 279, 115850.
- Süpürtülü, M., & Yılmaz, E. (2026). A Battery Cycle-Level RUL Estimation Method Based on Multi-Domain Features and an MCAS-Guided Dual-Attention Bi-LSTM. *Applied Sciences*, 16(4), 2070.
- Süpürtülü, M., Hatipoğlu, A., & Yılmaz, E. (2025). An analytical benchmark of feature selection techniques for industrial fault classification leveraging time-domain features. *Applied Sciences*, 15(3), 1457.
- Wang, X., Zhang, Y., Liu, Z., et al. (2023). A multi-task joint network for anomaly diagnosis and inconsistent cell identification in VRLA batteries. *Journal of Energy Storage*, 72, 108593.

EMEA ve NAFTA Çarpışma Testi Gerekliliklerinin Karşılaştırılması ve Araç Gövdesi Tasarımına Etkileri

Abdulgecit AYDIN

abdulgecit.aydin@tofas.com.tr; Tofaş Türk Otomobil Fabrikası Ar-Ge Merkezi, Bursa / Türkiye.

Özet

Otomotiv sektöründe, farklı bölgelerde uygulanan çarpışma güvenliği gereklilikleri, taşıyıcı gövde (Body-in-White – BIW) tasarımında önemli farklılıklara yol açmaktadır. Avrupa (EMEA) ve Kuzey Amerika (NAFTA) çarpışma testleri; test yöntemleri ve değerlendirme yaklaşımları açısından birbirinden ayrılmaktadır. EMEA testleri, gerçek kullanım koşullarını temsil eden deforme olabilir bariyer senaryolarına odaklanarak enerji sönmüleme ve yolcu korumasını ön plana çıkarmaktadır. Buna karşılık NAFTA testleri, rijit bariyer ve küçük örtüşmeli çarpışmalar gibi daha zorlayıcı senaryoları esas almakta ve yolcu kabinine olan yapısal içe göçmenin sınırlandırılmasını hedeflemektedir. Bu çalışma, söz konusu farklılıkların BIW tasarımına etkilerini incelemektedir. Sonuçlar, EMEA odaklı tasarımlarda yüklerin daha dengeli dağıtıldığını, NAFTA gerekliliklerinin ise özellikle A-sütunu ve marşbiyel gibi kritik bölgelerde ilave rijitlik ve lokal takviyeler gerektirdiğini göstermektedir. Sonuç olarak, NAFTA gerekliliklerinin daha kapsamlı ve zorlayıcı olması nedeniyle, araç gövdeleri NAFTA pazarı için daha yüksek dayanım seviyesinde tasarlanmakta; bu yapı EMEA pazarlarının gerekliliklerini de karşılayacak şekilde uyarlanabilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Çarpışma Dayanımı, BIW Tasarımı, EMEA Regülasyonları, NAFTA Standartları, Yapısal Bütünlük

Abstract

In the automotive industry, crash safety requirements applied in different regions lead to significant variations in Body-in-White (BIW) design. European (EMEA) and North American (NAFTA) crash tests differ in test methods and evaluation approaches. EMEA tests focus on deformable barrier scenarios representing real-world crash conditions, emphasizing energy absorption and occupant protection. In contrast, NAFTA tests are based on more demanding scenarios such as rigid barrier and small overlap crashes, aiming to minimize structural intrusion into the passenger compartment. This study examines the effects of these differences on BIW design strategies. Results show that EMEA-oriented designs distribute loads more evenly through progressive deformation, while NAFTA requirements necessitate increased stiffness and localized reinforcements, particularly in critical regions such as the A-pillar and rocker panels. Due to the comprehensive and demanding nature of NAFTA requirements, vehicle bodies are designed with higher structural strength.

Keywords: Crashworthiness, BIW Design, EMEA Regulations, NAFTA Standards, Structural Integrity

GİRİŞ

Araç güvenliği, otomotiv endüstrisinde tasarım ve mühendislik süreçlerini doğrudan etkileyen en kritik unsurlardan biridir. Özellikle küresel pazarlara yönelik geliştirilen araç platformlarında, farklı bölgelerde uygulanan çarpışma güvenliği regülasyonları ve tüketici testleri, taşıyıcı gövde (Body in White – BIW) tasarımında belirleyici rol oynamaktadır. Bu kapsamda Avrupa (EMEA) ve Kuzey Amerika (NAFTA) pazarlarında uygulanan çarpışma testleri; test senaryoları, değerlendirme kriterleri ve güvenlik yaklaşımları açısından önemli farklılıklar göstermektedir.

EMEA bölgesindeki regülasyonlar ve tüketici testleri, gerçek trafik kazalarını temsil eden deforme olabilir bariyerlere dayalı senaryolara odaklanmakta; enerji sönümleme, yük dağılımı ve yolcu korumasını ön planda tutmaktadır. Buna karşılık NAFTA bölgesinde uygulanan testler, rijit bariyer ve küçük örtüşmeli çarpışmalar gibi daha zorlayıcı senaryoları esas almakta ve yolcu kabini çevresindeki yapısal bütünlüğün korunmasına öncelik vermektedir. Bu farklı yaklaşımlar, BIW tasarımında yük yolu stratejilerinin, rijitlik dağılımlarının ve lokal takviye çözümlerinin yeniden değerlendirilmesini zorunlu kılmaktadır.

EMEA tek parça bir hukuki rejim değildir; bu çalışmada EMEA ifadesi, Avrupa eksenli tip onay pratiği ve UNECE düzenlemeleri etrafında şekillenen EMEA pazarları için operasyonel bir kısa ad olarak kullanılmıştır. Bu tercih, Avrupa Birliği'nin son yıllarda AB direktiflerini 1958 Anlaşması kapsamındaki BM düzenlemeleriyle uyumlu hale getirme ve mevzuatta UNECE regülasyonlarına doğrudan atıf yapma politikasından kaynaklanmaktadır (European Commission, n.d.). Buna karşılık NAFTA tarafı da tamamen homojen değildir; ABD'de FMVSS, Kanada'da FMVSS tabanlı TSD/CMVSS mimarisi ve Meksika'da FMVSS veya UNECE alternatiflerini kabul eden NOM-194-SE-2021 birlikte değerlendirilmektedir (Secretaría de Economía, 2022). Bu nedenle sağlıklı bir karşılaştırma yalnızca yasal minimum gerekliliklerin değil, aynı zamanda pazardaki fiilî mühendislik hedeflerini belirleyen tüketici testlerinin de birlikte değerlendirilmesini gerektirmektedir.

FIMCAR nihai raporu, bölgeler arası frontal çarpışma test felsefelerinin tarihsel olarak farklılaştığını açık biçimde ortaya koymaktadır. Avrupa homologasyonunda ECE R94 tabanlı %40 ofset deformable bariyer yaklaşımı öne çıkarken, ABD homologasyonunda full-width rigid barrier yaklaşımı baskın hale gelmiştir. Aynı rapor, tek bir test yönteminin hem self-protection hem de partner-protection kriterlerini aynı anda temsil etmekte yetersiz kaldığını; bu nedenle full-width ve offset/MDB testlerinin birlikte değerlendirilmesinin daha gerçekçi bir güvenlik değerlendirmesi sunduğunu belirtmektedir (FIMCAR, 2013). Bu yaklaşım, BIW tasarımının yalnızca belirli bir testi geçmeye odaklı değil, farklı yük yollarını aynı anda yönetebilen bütünlüklü bir mimari anlayışıyla ele alınması gerektiğini göstermektedir.

Son on yılda tüketici derecelendirme programları bu ayrımı daha da belirgin hale getirmiştir. Euro NCAP, 2020 sonrası dönemde MPDB frontal testi, artırılmış yanar darbe şiddeti ve far-side değerlendirmeleriyle araç uyumluluğu ve yük paylaşımı yaklaşımını güçlendirmiştir (Euro NCAP, 2023). Kuzey Amerika'da ise IIHS small overlap frontal testi ve güncellenmiş side impact testleri, yasal minimumların ötesinde yeni yapısal yük durumları oluşturmuştur. Buna ek olarak NHTSA NCAP programı, full-width rigid frontal, side barrier ve side pole testleri ile yüksek görünürlüğe sahip bir tüketici değerlendirme sistemi oluşturmaya devam etmektedir (NHTSA, n.d.). Böylece “regülasyona

uygun araç” ile “yüksek güvenlik derecelendirmesine sahip araç” arasındaki BIW tasarım farkı belirgin şekilde artmıştır.

Bu çalışmanın amacı, EMEA ve NAFTA çarpışma testi gerekliliklerini teknik parametreler ve mühendislik felsefeleri açısından karşılaştırmak; ardından bu farklılıkların BIW tasarımında ön yapı, yolcu hücresi, yan halka yapısı, tavan-eşik hattı ve yük yolu mimarisi üzerindeki etkilerini incelemektir. Çalışma özellikle, küresel platform kullanan araçların hangi test ailesine göre optimize edildiğinde diğer bölgelerde geç faz tasarım revizyonlarına ihtiyaç duyduğunu ortaya koymayı hedeflemektedir. Bu yönüyle çalışma, çarpışma güvenliği konusunu yalnızca regülasyon düzeyinde değil, doğrudan gövde mimarisi ve yapısal tasarım kararları perspektifinde değerlendirmektedir.

YÖNTEM

Araştırma, birincil dokümanlara dayalı karşılaştırmalı belge analizi olarak tasarlanmıştır. Kaynak korpusu yalnızca erişilebilir resmi düzenleme metinleri, resmi test protokolleri, resmi tüketici programı teknik sayfaları ve birincil teknik araştırma raporlarından oluşturulmuştur. EMEA kümesi, Avrupa Birliği[6] harmonizasyon açıklamaları, UNECE[7] düzenlemeleri ve Euro NCAP[8] protokolleri; NAFTA kümesi ise NHTSA[9] düzenleme ve NCAP dokümanları, IIHS[10] test açıklamaları, Transport Canada[11] teknik standart dokümanları ve Meksika’da Secretaría de Economía[12] tarafından yayımlanan NOM-194-SE-2021 üzerinden tanımlanmıştır. [13]

Analiz altı teknik ekseninde yürütülmüştür: darbe tipi, bariyer tipi, hız, örtüşme/orientasyon, yolcu değerlendirme mantığı ve BIW çıktısı. Her doküman önce “yasal taban” veya “tüketici hedefi” olarak sınıflandırılmış, daha sonra frontal ve yanal yükleme aileleri içinde yeniden kodlanmıştır. Son aşamada bu teknik farklar BIW tarafında yük yolu düzeni, ön modül-topoloji, A/B sütunu ve eşik kapasitesi, kapı halkası sürekliliği, ayak boşluğu ve teker yuvası davranışı, merkez hava yastığı/koltuk/orta konsol entegrasyonu gibi tasarım sonuçlarına dönüştürülmüştür. Meksika için norm başlığı ve yürürlük takvimi resmi norma sayfasından, norm içeriği ise yayımlanmış metinden doğrulanmıştır. Bu metin, 13 Mayıs 2026 itibarıyla erişilebilen resmi ve birincil dokümanlar temel alınarak hazırlanmıştır. [14]

BULGULAR

Karşılaştırmanın çerçevesi

EMEA ve NAFTA arasında görülen temel fark yalnızca test hızlarında değil, testlerin hangi güvenlik performansını değerlendirmeyi amaçladığında ortaya çıkmaktadır. EMEA tarafında UNECE homologasyonları temel güvenlik seviyesini tanımlarken, Euro NCAP aynı aracın partner koruması, yük yayılımı, far-side kinematiği ve yüksek şiddetli yanal çarpışma koşullarındaki performansını da değerlendirmektedir (Euro NCAP, 2023). Buna karşılık NAFTA tarafında FMVSS/CMVSS düzenlemeleri yasal tabanı oluşturmaya devam etse de, mühendislik geliştirme sürecini çoğu zaman IIHS small overlap frontal testi ve güncellenmiş side impact testleri belirlemektedir (Insurance Institute for Highway Safety [IIHS], n.d.). Ayrıca NHTSA NCAP programı, full-width rigid frontal ve side impact derecelendirmeleri ile tüketici odaklı görünürlüğü yüksek bir güvenlik hedefi oluşturmaktadır (National Highway Traffic Safety Administration [NHTSA], n.d.).

Bu bağlamda EMEA yaklaşımı daha çok “uyumluluk ve bütünsel yolcu koruması” ekseninde gelişirken, NAFTA yaklaşımı “köşe darbesi dayanımı, yüksek şiddetli yanal yükleme ve tüketici derecelendirme performansı” üzerine yoğunlaşmaktadır. Bu farklılıklar, BIW tasarımında yük yolu mimarisi, lokal rijitlik dağılımı ve yapısal takviye stratejileri üzerinde doğrudan etkili olmaktadır. Tablo 1’de, resmi test protokollerindeki temel farklılıkların BIW tasarımına olan özet etkileri sunulmaktadır.

Tablo 1. EMEA–NAFTA çarpışma testi farklarının BIW tasarımına özet etkisi

Boyut	EMEA baskın yaklaşımı	NAFTA baskın yaklaşımı	BIW tasarım çıktısı
Frontal ana felsefe	UNECE ofset tabanı + Euro NCAP MPDB ve full-width	FMVSS/CMVSS full-width tabanı + NHTSA NCAP + IIHS overlap testleri	Ön yapıda hem darbe emilimi hem yolcu hücresi darbe yönetimi birlikte optimize edilir
Uyumluluk	OLC, bariyer deformasyon homojenliği ve partner koruması açıkça değerlendirilir	Daha çok araç içi koruma ve tüketici test sonucu görünürlüğü öne çıkar	Tampon kirişi hizası, alt/üst yük yolları ve çoklu yük aktarımı önem kazanır
Köşe darbesi	MPDB ve yerel gereklilikler köşe yüklerini dolaylı olarak zorlar	IIHS small overlap doğrudan dış ön köşeyi hedef alır	Teker yuvası, menteşe direği, ön üst yan üye ve rocker bağlantıları güçlenir
Yanal darbe	Euro NCAP 60 km/h AE-MDB, pole ve far-side	FMVSS/CMVSS 214, NHTSA NCAP ve IIHS SUV-benzeri side yüklemesi	B sütunu, eşik, tavan yan kirişi ve kapı halkası kapasitesi artar
Geliştirme süreci	Sanal test + fiziksel test entegrasyonu daha erken ve daha görünür	Tüketici test başarısı üzerinden geç faz revizyon baskısı daha yüksektir	Global platformlarda erken CAE hedef kaskadı kritik hale gelir

Not: Tablo, UN Regulation No. 94 ve UN Regulation No. 95 homologasyon gereklilikleri, Euro NCAP MPDB, Full Width, AE-MDB, Pole ve Far Side test protokolleri, FMVSS 208/214 düzenlemeleri, NHTSA NCAP, IIHS çarpışma testleri ve NOM-194-SE-2021 dokümanlarında yer alan teknik gereklilikler temel alınarak oluşturulmuştur (Euro NCAP, 2023; IIHS, n.d.; NHTSA, n.d.; UNECE, 2022’a, 2022b).

Tablo 1 incelendiğinde, EMEA ve NAFTA çarpışma güvenliği yaklaşımlarının yalnızca test prosedürleri açısından değil, aynı zamanda araç gövdesi tasarım felsefesi açısından da belirgin farklılıklar oluşturduğu görülmektedir. EMEA yaklaşımı; yük paylaşımı, araç uyumluluğu ve kontrollü enerji sönmüleme davranışına odaklanırken, NAFTA yaklaşımı daha çok yapısal intrüzyonun sınırlandırılması ve lokal yüksek dayanım gerektiren darbe senaryolarına yoğunlaşmaktadır. Özellikle IIHS small overlap testi, geleneksel ön uzunlamasına kırımların devre dışı kalabildiği yük durumları oluşturarak BIW tasarımında A sütunu tabanı, rocker ve wheelhouse bölgelerinde ilave yapısal güçlendirme ihtiyacı doğurmaktadır.

Yanal darbe tarafında ise Euro NCAP far-side ve AE-MDB protokolleri araç içi yolcu hareketlerini ve araçlar arası uyumluluğu ön plana çıkarırken, IIHS side impact yaklaşımı daha ağır ve yüksek yapılı

araç bariyerleri ile BIW üzerinde daha yüksek lokal yüklemeler oluşturmaktadır. Bu durum özellikle B sütunu, eşik bölgesi, tavan yan kirişi ve kapı halkası yapılarında daha yüksek rijitlik gereksinimlerine neden olmaktadır.

Sonuç olarak küresel araç platformlarında yalnızca yasal homologasyon gerekliliklerini karşılamak yeterli olmamakta; aynı zamanda farklı tüketici test programlarının oluşturduğu yük senaryolarını birlikte yönetebilen çoklu yük yolu mimarilerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle modern BIW tasarımı, tek bir test optimizasyonundan ziyade çok senaryolu yapısal performans yaklaşımına doğru evrilmektedir.

Frontal darbe gereklilikleri

EMEA yasal tabanında UNECE R94, 56 km/h hızda %40 örtüşmeli deformable bariyer senaryosunu tanımlamaktadır (UNECE, 2022a). Bunun üzerine Euro NCAP, frontal değerlendirmeyi iki ayrı eksenle sertleştirmiştir: MPDB protokolünde hem araç hem trolley için 50 km/h $\pm$ 1 km/h hız ve %50 örtüşme kullanılırken, full-width rigid barrier protokolünde test aracı 50 km/h $\pm$ 1 km/h hızla rijit duvara çarpıtılmaktadır (Euro NCAP, 2023a, 2023b). Ayrıca Euro NCAP MPDB yaklaşımı yalnızca occupant risk'e bakmamakta; OLC, bariyer yüzü deformasyon homojenliği ve bottoming-out gibi ölçüler üzerinden araç uyumluluğunu da puanlamaya katmaktadır. Euro NCAP'in 2023 ESV yayını, bu programın dünyada araç uyumluluğunu açıkça değerlendiren ilk tüketici programı olduğunu vurgulamaktadır (Ellway et al., 2023).

NAFTA tarafında frontal yükleme daha katmanlıdır. FMVSS 208 ve buna dayalı Kanada TSD 208, bazı sertifikasyon yollarında 56 km/h'ye kadar full frontal fixed rigid barrier koşulunu içermektedir (NHTSA, 2026; Transport Canada, 2022). NHTSA NCAP ise kamuya dönük 5 yıldız programında 35 mph sabit bariyer full frontal testi kullanmaktadır (NHTSA, n.d.). Bunun yanında IIHS moderate overlap testi 40 mph hızda %40 örtüşme ile, small overlap testi ise 40 mph hızda %25 örtüşme ile uygulanmaktadır; small overlap sürücü ve yolcu tarafı ayrı ayrı test edilmektedir (IIHS, n.d.-a, n.d.-b). IIHS destekli 2023 çalışması, good dereceli bir small-overlap performansının poor dereceli araçlara göre frontal çarpışmalarda sürücü ölüm riskini yaklaşık %12 azaltabildiğini göstermiştir (Teoh & Monfort, 2023). Böylece Kuzey Amerika'da yasal tabanın ötesinde asıl sertleştirici etki, özellikle small overlap üzerinden dış ön köşede yoğunlaşmaktadır.

Bu farkın BIW sonucu açıktır. EMEA'nın MPDB ve uyumluluk mantığı, ön tampon kirişi, alt yük yolu, üst yük yolu ve ön uzunlamasına elemanların karşı tarafla daha düzgün yük alışverişi yapmasını istemektedir. FIMCAR çalışması, çoklu yük yolu kullanan mimarilerin ve tamponun çok gerisinde olmayan alt yük yollarının önemli avantajlar sağladığını göstermektedir (FIMCAR, 2013). NAFTA small overlap mantığı ise ana uzunlamasına kirişin devreye girmediği senaryolarda dış köşenin alternatif enerji yolu üretebilmesini gerektirmektedir. Bu nedenle global BIW'lerde yalnız merkezî front-rail dayanımını artırmak yeterli olmamakta; teker-arka itme kontrolü, teker yuvası üstü, ön üst yan üye, menteşe direği ve rocker arasında kapalı veya yarı kapalı bir köşe yük halkası oluşturulması gerekmektedir. Bu değerlendirme, resmi test gerekliliklerinin birlikte analiz edilmesine dayalı bir mühendislik çıkarımıdır.

Yanal darbe gereklilikleri

EMEA tarafında UNECE R95, yanal çarpışma homologasyonu için 50 ± 1 km/h hareketli deformable bariyer koşulunu öngörmektedir (UNECE, 2022b). Euro NCAP ise bu alanı belirgin biçimde zorlaştırmıştır. 2023 tarihli AE-MDB protokolünde trolley hedef hızı $60 \text{ km/h} \pm 1 \text{ km/h}$ olarak verilmekte, oblique pole protokolünde ise araç $75^\circ \pm 3^\circ$ açıyla 32 ± 0.5 km/h hızda direkte test edilmektedir (Euro NCAP, 2023c, 2023d). Euro NCAP ESV 2023 yayını, 2020 güncellemesinde side impact bariyer hızının 50'den 60 km/h'ye, bariyer kütlelerinin ise 1300'den 1400 kg'a çıkarıldığını doğrulamaktadır (Ellway et al., 2023). Buna ek olarak far-side protokolü, 2024'ten itibaren sanal test verisini zorunlu kılmakta ve BIW temelli kızak düzeneği üzerinden struck-side ve non-struck-side kinematiklerini birlikte incelemektedir (Euro NCAP, 2023e).

NAFTA tarafında FMVSS 214 ve buna dayalı Kanada TSD 214, 53 ± 1 km/h hareketli deformable bariyer testi ile 32 km/h 'ye kadar side pole testini 75° geometriyle tanımlamaktadır (NHTSA, 2026; Transport Canada, 2016). NHTSA NCAP, tüketici tarafında 3,015 lb hareketli bariyeri 38.5 mph hızda duran araca çarptırmakta; side pole derecelendirmesinde aracı 75° açıyla 20 mph hızda 25 cm çaplı direğe sürüklemektedir (NHTSA, n.d.). IIHS güncel side testinde ise 4,200 lb'lık, modern SUV ön yüz yüksekliğini temsil eden bir bariyer aracın sürücü tarafına 37 mph hızla çarpmaktadır (IIHS, n.d.-c). Dolayısıyla yasal eşiklerde EMEA ve NAFTA birbirine nispeten yakın görünse de, tüketici testleri seviyesinde Euro NCAP far-side ve IIHS SUV-benzeri yanal yüklemeleri farklı mühendislik baskıları oluşturmaktadır.

BIW açısından bunun anlamı, yan halka yapısının artık yalnızca B sütunu etrafında düşünülmemesidir. EMEA'de AE-MDB, oblique pole ve far-side protokolleri birlikte değerlendirildiğinde; kapı bağlantıları, eşik, tavan yan kirişi ve çatı-kantar hattının yapısal stabilitesi doğrudan önem kazanmaktadır. Far-side protokolü açık biçimde kapı/menteşe/latch sistemleri, roof/cant rail ve sill bölgelerinde yapısal stabilite aramakta; ayrıca center airbag gibi far-side koruma sistemlerinin doğru çalışmamasını puan kaybı nedeni olarak değerlendirmektedir (Euro NCAP, 2023e). Kuzey Amerika'da ise IIHS side testi özellikle B sütunu, eşik ve kapı içi yük yolunu modern SUV yükleme koşulları altında zorlamaktadır (IIHS, n.d.-c). Bu nedenle çift bölgeli bir BIW stratejisinde B sütunu, eşik, tavan yan kirişi ve kapı halkası çevresinde daha yüksek lokal dayanım, kontrollü kesit kapanması ve daha doğrudan yük aktarımı teknik olarak gerekli hale gelmektedir. Bu yaklaşım, resmi test protokollerinin ortak mühendislik sonucu olarak değerlendirilmektedir.

BIW tasarımına bütünlük etkiler

Bulgular topluca değerlendirildiğinde, EMEA ve NAFTA için “aynı BIW ancak farklı tuning” yaklaşımının sınırlarına ulaşıldığı görülmektedir. EMEA tarafında MPDB uyumluluk yaklaşımı; bariyer yüzeyinde homojen deformasyon, kontrollü yük paylaşımı ve sınırlı OLC değerleri hedeflediği için tampon kirişi sürekliliği, alt yük yolu erişimi, ön modül geometrisi ve ayak boşluğu çevresindeki enerji yönetimini kritik hale getirmektedir. Euro NCAP verileri, daha yüksek araç kütlelerinin tek başına yeterli olmadığını ve ağır araçların da uyumluluk kriterleri açısından puan kaybı yaşayabildiğini göstermektedir (Ellway et al., 2023). Bu durum, ön gövde yapısında “akıllı sertlik dağılımı” yaklaşımının önemini artırmaktadır.

NAFTA tarafında ise small overlap yaklaşımı, BIW'in dış ön köşesinde farklı bir yapısal mimari gerektirmektedir. IIHS'ye göre bu senaryo çoğu durumda doğrudan frame-rail teması olmadan gerçekleşmekte; bu nedenle yolcu hücresi ve çevresel yapılar çarpışma enerjisinin büyük bölümünü yönetmek zorunda kalmaktadır (IIHS, n.d.-b). Bu doğrultuda North America odaklı BIW tasarımında, ön tekerin kabine itilmesini sınırlandıran wheelhouse yapısı, rocker-alt yük yolu bağlantısı, A sütunu tabanı ve menteşe direği çevresi kritik yapısal bölgeler haline gelmektedir. Ayrıca small overlap performansının gerçek dünya ölüm riskini azaltması, bu testin yalnızca tüketici derecelendirmesi odaklı bir yaklaşım olmadığını göstermektedir (Teoh & Monfort, 2023).

En rasyonel küresel çözüm, FIMCAR çalışmasının da işaret ettiği gibi, çoklu yük yolu kullanan ve alt yük yolunu tampon hattından aşırı uzaklaştırmayan bir ön gövde mimarisinin; IIHS small overlap testinin zorladığı dış köşe yük yolu ile aynı yapısal sistem içerisinde bütünleştirilmesidir (FIMCAR, 2013). Buna ek olarak yanall tarafta güçlü eşik-B sütunu-tavan yan kirişi üçgeni, kapı halkası sürekliliği ve far-side koruması için center airbag, koltuk ve orta konsol entegrasyonunun birlikte optimize edilmesi gerekmektedir. Bu yaklaşım, bölgesel farklılıkların daha az geç faz yapısal revizyon ile karşılanabilmesini mümkün kılmaktadır. Bunun doğal sonucu ise erken faz CAE hedeflerinin daha karmaşık hale gelmesi ve geleneksel “pass/fail regulation” yaklaşımından çok senaryolu performans optimizasyonu yaklaşımına geçilmesidir. Bu değerlendirme, resmi regülasyonlar ve tüketici test protokollerinin birlikte analiz edilmesine dayalı mühendislik yorumudur.

SONUÇ VE TARTIŞMA

Bu çalışma, EMEA ve NAFTA arasında asıl farkın yalnızca test parametrelerinde değil, çarpışma güvenliğini tanımlama biçiminde olduğunu göstermiştir. EMEA'de UNECE homologasyonu temel emniyet eşliğini belirlese de asıl mühendislik baskısı Euro NCAP'in uyumluluk, MPDB, full-width, yüksek şiddetli side impact ve far-side gerekliliklerinden kaynaklanmaktadır (Euro NCAP, 2023a, 2023b, 2023c, 2023e). NAFTA'da ise yasal taban FMVSS/CMVSS ile kurulmakla birlikte, ürün farklılaştırması ve fiili tasarım zorluğu büyük ölçüde IIHS small overlap ve güncel side testleri ile NHTSA NCAP'in görünür derecelendirme sisteminden kaynaklanmaktadır (IIHS, n.d.-b, n.d.-c; NHTSA, n.d.). Dolayısıyla iki bölgenin BIW tasarım talepleri, “aynı hedefin farklı hızları” değil, kısmen farklı yük yolu felsefeleri olarak değerlendirilmelidir.

Tartışma açısından en kritik sonuç, yalnızca homologasyon odaklı geliştirilen küresel platformların tüketici testlerinde geç faz yapısal revizyon riski taşımasıdır. EMEA'de bu risk çoğunlukla ön yapı homojenliği, partner koruması ve far-side entegrasyonu alanlarında ortaya çıkarken; NAFTA'da dış ön köşe yüklemesi ve SUV-benzeri yanall darbe koşulları altında belirginleşmektedir (Ellway et al., 2023; IIHS, n.d.-b, n.d.-c). Bu nedenle BIW tasarım kararları yalnızca “hangi regülasyonu sağlıyorum?” sorusuyla değil, “hangi test kombinasyonu geç faz revizyon riskini azaltır?” sorusuyla ele alınmalıdır. Bu yaklaşım, tasarım kararlarını ön tampon kirişi ilişkisi, alt/üst yük yolu mimarisi, teker yuvası-kabin etkileşimi ve kapı halkası yapısı gibi kritik bölgelere daha erken geliştirme fazlarında taşımaktadır.

Bu kapsamda, BIW tasarımına etkilerin üç ana başlık altında değerlendirilmesi uygun görülmektedir: ön yapı uyumluluğu ve yük yayılımı, köşe darbesi dayanımı ve yan halka/far-side bütünlüğü. Ayrıca kaynak doğruluğunu korumak için her test parametresinin ilgili resmi doküman başlığı ve protokol versiyonu ile verilmesi önemlidir. Özellikle Euro NCAP protokollerinde yıl ve versiyon farklılıklarının

karıştırılmaması, çalışmanın teknik güvenilirliğini artıracaktır. Bu çalışma, erişilebilir resmi regülasyonlar, tüketici test protokolleri ve birincil teknik kaynaklar temel alınarak oluşturulmuş olup, küresel BIW platformlarında bölgesel çarpışma gerekliliklerinin erken faz tasarım kararlarına entegre edilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

KAYNAKÇA

Ellway, J., van Ratingen, M., Sandner, V., Eggers, A., & Langner, T. (2023). *Moving towards Vision Zero: Euro NCAP's evolving crash compatibility and side impact assessment approaches*. 27th Enhanced Safety of Vehicles (ESV) Conference.

https://cdn.euroncap.com/cars/assets/27esv_000312_883b2ae74d.pdf

European Commission. (n.d.). *International technical harmonisation of motor vehicles*.

https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/automotive-industry/technical-harmonisation/international-technical-harmonisation_en

Euro NCAP. (2023a). *Euro NCAP frontal MPDB test protocol version 11.4*.

https://cdn.euroncap.com/cars/assets/euro_ncap_mpdb_testing_protocol_v114_905e90baee.pdf

Euro NCAP. (2023b). *Euro NCAP frontal full width rigid barrier test protocol version 12.1*.

https://cdn.euroncap.com/cars/assets/euro_ncap_frontal_fw_test_protocol_v121_975675fbcf.pdf

Euro NCAP. (2023c). *Euro NCAP side impact AE-MDB test protocol version 8.3*.

https://cdn.euroncap.com/cars/assets/euro_ncap_side_protocol_ae_mdb_v83_d3cb49e8c5.pdf

Euro NCAP. (2023d). *Euro NCAP oblique pole side impact protocol version 7.2*.

https://cdn.euroncap.com/cars/assets/euro_ncap_pole_protocol_oblique_impact_v72_098f0198b5.pdf

Euro NCAP. (2023e). *Euro NCAP far side occupant protection protocol version 2.5*.

https://cdn.euroncap.com/cars/assets/euro_ncap_far_side_test_and_assessment_protocol_v25_ade7091eed.pdf

FIMCAR. (2013). *Frontal impact and compatibility assessment research: Final report*. CORDIS – European Commission. <https://cordis.europa.eu/project/id/234216/reporting>

Insurance Institute for Highway Safety. (n.d.-a). *Moderate overlap front crash test*.

<https://www.iihs.org/ratings/about-our-tests/moderate-overlap-front>

Insurance Institute for Highway Safety. (n.d.-b). *Small overlap front crash test*.

<https://www.iihs.org/ratings/about-our-tests/small-overlap-front>

Insurance Institute for Highway Safety. (n.d.-c). *Side crash test*.

<https://www.iihs.org/ratings/about-our-tests/side>

National Highway Traffic Safety Administration. (n.d.). *New Car Assessment Program (NCAP)*. <https://www.nhtsa.gov/ratings>

National Highway Traffic Safety Administration. (2026). *Federal Motor Vehicle Safety Standard No. 208: Occupant crash protection (49 CFR §571.208)*. <https://www.ecfr.gov/current/title-49/subtitle-B/chapter-V/part-571/subpart-B/section-571.208>

National Highway Traffic Safety Administration. (2026). *Federal Motor Vehicle Safety Standard No. 214: Side impact protection (49 CFR §571.214)*. <https://www.ecfr.gov/current/title-49/subtitle-B/chapter-V/part-571/subpart-B/section-571.214>

Secretaría de Economía. (2022). *NOM-194-SE-2021: Dispositivos de seguridad esenciales en vehículos nuevos*. <https://platiica.economia.gob.mx/normalizacion/nom-194-se-2021/>

Teoh, E. R., & Monfort, S. S. (2023). IIHS small overlap frontal crash test ratings and real-world driver death risk. *Traffic Injury Prevention*, 24(5), 409–413.
<https://doi.org/10.1080/15389588.2023.2199342>

Transport Canada. (2016). *Technical standards document No. 214: Side impact protection*. https://tc.canada.ca/sites/default/files/migrated/tsd_214.pdf

Transport Canada. (2022). *Technical standards document No. 208: Occupant crash protection*. https://tc.canada.ca/sites/default/files/2022-03/TSD_208_rev_2.pdf

United Nations Economic Commission for Europe. (2022a). *UN Regulation No. 94: Protection of occupants in the event of a frontal collision*. <https://unece.org/transport/documents/2022/12/standards/regulation-no-94-rev4>

United Nations Economic Commission for Europe. (2022b). *UN Regulation No. 95: Protection of occupants in the event of a lateral collision*. <https://unece.org/transport/documents/2022/12/standards/un-regulation-no-95-revision-3>

United Nations Economic Commission for Europe. (2023). *UN Regulation No. 135: Pole side impact performance*. <https://unece.org/transport/documents/2023/02/standards/un-regulation-no-135-revision-1-amendment-4>

Otomotiv Sektöründe Çevrimiçi Satış Modelinin Elektrik-Elektronik Sistem Fonksiyonlarına Etkisi: OTA, Uzaktan Teşhis ve Siber Güvenlik Perspektifi

Serkan DEMİR¹, Meltem SÜPÜRTÜLÜ²

¹E-mail: serkan.demir59443@tofas.com.tr; TOFAŞ AR&GE Merkezi, Türk Otomobil Fabrikası, Bursa/Türkiye, ORCID: 0009-0008-7378-958X

²E-mail: meltem.supurtulu@tofas.com.tr; TOFAŞ AR&GE Merkezi, Türk Otomobil Fabrikası, Bursa/Türkiye, ORCID: 0000-0003-0473-7731.

Özet

Otomotiv sektöründe dijital teknolojilerin artan ölçüde benimsenmesi, geleneksel bayilik temelli yapılardan çevrimiçi araç satış platformlarına geçişi önemli ölçüde hızlandırmıştır. Bu dönüşüm, yalnızca ticari iş akışlarını yeniden şekillendirmekle kalmamakta, aynı zamanda araç içi elektrik-elektronik (E/E) sistemlerin fonksiyonel gereksinimlerini de doğrudan etkilemektedir. Özellikle doğrudan müşteriye yönelik satış modelleri, araçların havadan-kablosuz güncellemeler (OTA, over-the-air) mekanizmaları yoluyla uzaktan yazılım güncellemeleri alabilmesini, arıza tespiti için uzaktan teşhis sistemleri aracılığıyla yapılabilmesini mümkün kılmakta ve bununla birlikte yeni siber güvenlik risklerini gündeme getirmektedir. Bu çalışma, çevrimiçi araç satış süreçlerinin E/E sistem mimarisi üzerindeki teknik yansımalarını incelemekte ve otomotiv üreticilerinin bu dönüşüme nasıl uyum sağladığını ortaya koymaktadır. Ayrıca, teknik personelin rollerinde meydana gelen değişimler, servis operasyonlarının yeniden yapılandırılması ve uzaktan destek teknolojilerinin artan önemi de ele alınmaktadır. Araştırma, E/E sistem işlevleri odağında ilerleyerek otomotiv satış süreçlerinin dijitalleşmesine bağlı riskler ve fırsatlar konusunda stratejik çıkarımlar sunmayı amaçlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Çevrimiçi araç satışı, doğrudan satış modeli, elektrik-elektronik sistemler, OTA güncellemeleri, uzaktan teşhis.

Abstract

The increasing adoption of digital technologies in the automotive industry has accelerated the shift from conventional dealership-based structures to online vehicle sales platforms. This transition not only reshapes commercial workflows but also impacts on the functional requirements of in-vehicle electrical and electronic (E/E) systems. In particular, direct-to-customer models enable vehicles to receive software updates remotely via over-the-air (OTA) mechanisms, facilitate fault detection through remote diagnostics, and introduce new challenges regarding cybersecurity. This study

investigates the technical implications of online vehicle sales on E/E system architecture, highlighting how automotive manufacturers have adapted their infrastructure accordingly. Changes in the roles of technical personnel, the reconfiguration of service operations, and the growing significance of remote support technologies are also discussed. By focusing on E/E system functions, this paper aims to offer strategic insights into the risks and opportunities associated with the digitalization of automotive sales.

Keywords: Direct-to-customer sales, electrical and electronic systems, OTA updates, remote diagnostics, online vehicle sales.

GİRİŞ

Otomotiv endüstrisi, dijitalleşmenin etkisiyle köklü bir dönüşüm sürecinden geçmektedir. Bu dönüşüm, üretim süreçlerinden kullanıcı deneyimlerine, bakım servislerinden satış yöntemlerine kadar birçok yapıyı yeniden şekillendirmektedir. Özellikle satış modellerinde yaşanan değişim, hem ticari işleyişi hem de araç içi teknik sistemleri doğrudan etkilemektedir. Bu bağlamda çalışmanın amacı, çevrimiçi satış yapısının elektrik-elektronik (E/E) sistemler üzerindeki teknik etkilerini disiplinler arası bir yaklaşımla değerlendirmektir. Uzun yıllar boyunca otomobil satışlarında temel kanal olarak kullanılan bayilik sistemi, üretici ile son kullanıcı arasında fiziksel temas sağlayan ve satış sonrası hizmetleri de kapsayan bütüncül bir yapıya sahiptir. Yetkili bayiler, araç satışı dışında finansman desteği, takas işlemleri, test sürüşleri ve garanti hizmetleri gibi birçok süreci de organize etmektedir [1]. Bu yapı, üretici firmalar açısından coğrafi yayılım sağlarken, müşteriler için yerel erişilebilirlik ve fiziksel güven oluşturmuştur. Ancak bayiliklerin yüksek operasyonel maliyetleri, sınırlı stok kontrolü ve fiyat politikalarında homojenliğin sağlanamaması gibi dezavantajları da bulunmaktadır [2].

Günümüzde dijital kanallar üzerinden alışverişe olan yönelim, otomotiv sektöründe de kendini göstermektedir. Özellikle pandemi süreciyle birlikte çevrimiçi platformlar üzerinden araç konfigürasyonu, siparişi ve teslimat planlaması gibi adımlar kullanıcılar tarafından daha fazla benimsenmiştir [3]. Elektrikli araç üreticileri başta olmak üzere birçok global marka, doğrudan kullanıcıya ulaşan çevrimiçi satış modelini pilot uygulamalarla devreye almıştır. Bu yaklaşım, marka kontrolünü güçlendirmekte, fiyat şeffaflığını artırmakta ve dağıtım maliyetlerini azaltmaktadır [4]. Teknolojik açıdan bakıldığında, çevrimiçi satış modeliyle birlikte araçların yazılım odaklı yönetimi (OTA güncellemeleri), arızaların uzaktan tespiti ve siber güvenlik önlemlerinin kapsamı gibi konular kritik hale gelmiştir. Bu yeni sistemde, E/E fonksiyonlar sadece kullanıcı deneyimi için değil, satış ve satış sonrası hizmetlerin kesintisiz devamı açısından da kilit rol oynamaktadır.

Bu çalışma, otomotiv sektöründe giderek yaygınlaşan çevrimiçi satış modelinin, elektrik-elektronik (E/E) sistem fonksiyonları üzerindeki teknik etkilerini analiz etmeyi amaçlamaktadır. Özellikle havadan-kablosuz (OTA, over-the-air) yazılım güncellemeleri, uzaktan teşhis (remote diagnostics) uygulamaları ve siber güvenlik mimarileri, bu dönüşüm sürecinde yeniden ele alınması gereken temel alanlardır. Çalışma kapsamında; geleneksel bayilik modeli ile çevrimiçi satış yapısının teknik

farklılıkları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiş, üretici firmaların sistem mimarilerini bu geçişe nasıl uyarladığı incelenmiştir. Ayrıca, teknik personel rollerinde yaşanan değişim, servis altyapısının yeniden yapılandırılması ve tüketici deneyimi açısından ortaya çıkan yeni beklentiler de analiz edilmiştir. Bu bağlamda çalışma, hem üretici firmalara hem de teknik kadrolara yönelik stratejik çıkarımlar ve öneriler sunmayı hedeflemektedir. Araştırmanın çıktılarının, özellikle elektrikli ve bağlantılı araçlar alanında gelecek planlamalarına katkı sağlaması beklenmektedir.

OTOMOTİV SEKTÖRÜNDE ÇEVİRİMİÇİ SATIŞA GEÇİŞ SÜRECİ

Son yıllarda dijitalleşmenin küresel ölçekte hız kazanması, otomotiv sektörünü yalnızca üretim ve tasarım süreçleri açısından değil, aynı zamanda satış ve müşteri ilişkileri boyutunda da köklü bir dönüşüme zorlamıştır. Bu dönüşümün en belirgin göstergelerinden biri, çevrimiçi satış sistemlerinin giderek yaygınlaşması ve geleneksel bayilik temelli satış yapılarının yerini dijital öncelikli çözümlere bırakmaya başlamasıdır. Başlangıçta otomotiv üreticilerinin web siteleri ve dijital platformları yalnızca araç bilgilerini sunmak, teknik özellikleri listelemek ve kullanıcıları en yakın yetkili bayiye yönlendirmek gibi sınırlı işlevlerle hizmet vermektedir. Ancak zamanla kullanıcı beklentilerinin değişmesi, dijital teknolojilerin olgunlaşması ve internet tabanlı hizmetlerin yaygınlaşmasıyla birlikte, bu platformlar daha gelişmiş ve kullanıcı etkileşimini artıran araçlara evrilmiştir [5].

Günümüzde birçok otomotiv markası, çevrimiçi ortamda araç konfigürasyonu yapma, opsiyon paketlerini karşılaştırma, kredi ve sigorta başvurusu gerçekleştirme, ödemeleri tamamlama ve hatta aracı doğrudan teslimat adresine yönlendirme gibi tüm satın alma sürecini kapsayan uçtan uca çözümler sunmaktadır. Bu dijitalleşme süreci, yalnızca teknik bir ilerleme olarak değil, aynı zamanda tüketici deneyiminde yeni bir paradigma değişikliği olarak değerlendirilmelidir. Özellikle yeni nesil araç üreticileri, geleneksel bayilik ağlarını devre dışı bırakarak doğrudan tüketiciye ulaşan satış modelleri geliştirmiş ve bu sayede satış sürecinin tüm aşamalarını üretici kontrolü altında toplamayı başarmıştır. Bu yaklaşım, yalnızca lojistik ve operasyonel maliyetlerin azaltılmasına değil, aynı zamanda marka algısının ve müşteri sadakatinin doğrudan üretici tarafından şekillendirilmesine de olanak tanımaktadır [6].

Çevrimiçi doğrudan satış sistemini benimseyen ilk öncülerden biri, premium segmentte faaliyet gösteren ve elektrikli araç teknolojilerine odaklanan bir marka olmuştur. Bu üretici, yalnızca güçlü dijital altyapıya sahip bir web platformu sunmakla kalmayıp, aynı zamanda fiziksel bayilik ağını tamamen ortadan kaldırarak sektör normlarına meydan okuyan bir yapı oluşturmuştur. Diğer yeni nesil üreticiler de benzer yaklaşımlar geliştirerek çevrimiçi müşteri etkileşimini merkeze alan dijital satış modelleriyle pazarda konumlarını güçlendirmiştir. Geleneksel OEM'ler de bu eğilim karşısında pozisyonlarını yeniden değerlendirmeye başlamış ve hibrit yapılar oluşturarak hem çevrimiçi hem fiziksel temas noktalarını optimize eden çözümler geliştirmeye yönelmişlerdir. Bu dijital dönüşüm yalnızca üretici perspektifinden değil, aynı zamanda kullanıcı davranışları açısından da anlamlı değişiklikleri beraberinde getirmiştir. Geleneksel bayi ziyaretleri, fiziksel inceleme ve test sürüşü gibi aşamalar, artık yerini dijital ortamda yürütülen kapsamlı araç tanıtımlarına, sanal gerçeklik destekli iç mekân keşiflerine ve çevrimiçi müşteri temsilcisi etkileşimlerine bırakmaktadır. Kullanıcılar, zaman tasarrufu sağlayan, fiyat konusunda şeffaflık sunan, sabit fiyat garantisi sağlayan ve kendi tercihlerine göre yapılandırılabilir araç seçeneklerine ulaşabildikleri bu yeni modelde, geleneksel alışkanlıklarından büyük ölçüde uzaklaşmıştır [7]. Özellikle COVID-19 pandemisi süresince, temassız hizmet sunumu ve zamandan bağımsız işlem yapabilme ihtiyacı, çevrimiçi satış modelinin yaygınlaşmasını önemli ölçüde hızlandırmıştır. Pandemi, fiziksel temasın sınırlandığı bir ortamda, araç satın alma gibi yüksek değerli

işlemlerin dahi dijital ortamda güvenle gerçekleştirilebileceğini göstererek bu modelin kalıcılığını pekiştirmiştir [8]. Bugün artık birçok tüketici, sürecin tamamını evinden çıkmadan gerçekleştirebileceği, ihtiyacına göre ürün ve hizmetleri seçebileceği ve gerektiğinde çevrimiçi destek alabileceği çözümleri tercih etmektedir. Bu bağlamda, çevrimiçi satış sistemleri yalnızca geçici bir eğilim değil, otomotiv sektörünün dijitalleşen geleceğinde temel bir yapı taşı olarak değerlendirilmektedir.

ELEKTRİK-ELEKTRONİK SİSTEM FONKSİYONLARINA ETKİSİ

Çevrimiçi satışın arka planında çok katmanlı teknik bir yapı bulunmaktadır. Araç üzerindeki donanım ve yazılım sistemlerinin çevrimiçi yapı ile bütünleşmiş biçimde çalışması; veri güvenliği, uzaktan erişilebilirlik, yüksek sistem uyumluluğu gibi yeni gereksinimleri gündeme getirmiştir. Bu bağlamda, sadece satış süreci değil, aynı zamanda servis, bakım, güncelleme ve müşteri ilişkileri gibi destekleyici tüm yapıların da yeniden dijital mimarilerle kurgulanması gerekmektedir. Dolayısıyla, çevrimiçi satış yapıları yalnızca geçici bir yenilik değil, otomotiv sektöründe kalıcı bir paradigma değişiminin parçası olarak değerlendirilmektedir. Bu yapılar, aynı zamanda elektrik-elektronik sistem mühendisliğinin daha esnek, modüler ve uzaktan yönetilebilir bir yapıya evrilmesini de zorunlu kılmaktadır. Bu bölümde, Şekil 1’de gösterildiği gibi E/E sistemler üzerindeki üç temel etki alt başlıklar halinde ele alınmaktadır.

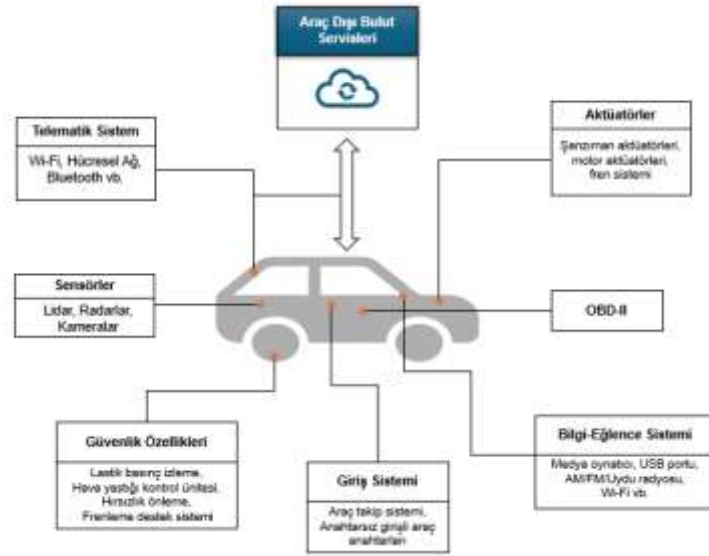


Şekil 1. Çevrimiçi Satış Modelinin Elektrik-Elektronik (E/E) Sistem Fonksiyonları Üzerindeki Teknik Etki Alanları.

1. Havadan-Kablosuz (OTA, Over-The-Air) Güncellemeler ve Sistem Mimarisi

Geleneksel bayilik sisteminde, araç yazılım güncellemeleri çoğunlukla fiziksel servis müdahalesini gerektiren, zaman alan ve kullanıcı açısından ek operasyon yükü oluşturan işlemler şeklinde yürütülmektedir. Bu süreç, kullanıcıların servis noktalarına ulaşmasını, yazılım yükleme işlemlerinin manuel olarak gerçekleştirilmesini ve test sürüşlerinin yapılmasını zorunlu kılmaktadır. Ancak çevrimiçi satış modellerinin benimsenmesi ve özellikle bağlantılı (connected) araçların yaygınlaşmasıyla birlikte, OTA güncellemeleri otomotiv yazılım yönetiminin temel bileşeni haline gelmiştir. OTA teknolojisi, üreticilerin araçlara doğrudan ve güvenli bir şekilde yazılım paketi göndermesine olanak tanıyarak, kullanıcı müdahalesine gerek kalmadan sistemlerin uzaktan güncellenmesini mümkün kılmıştır [9]. Bu gelişim, E/E mimarinin yeniden yapılandırılmasını zorunlu kılmıştır. Özellikle modülerlik, yüksek bant genişliğine sahip veri iletimi, ağ güvenliği ve sistemler arası eşgüdüm, OTA sistemlerinin sürdürülebilirliği açısından kritik öneme sahiptir (Şekil 2).

Araç içi bilgi-eğlence birimi (IVI), telematik kontrol ünitesi (TCU) ve gelişmiş sürücü destek sistemleri (ADAS) gibi bileşenler arasındaki iletişim, senkronize ve gecikmesiz çalışacak şekilde planlanmalıdır. Buna ek olarak, yazılım güncellemelerinin sürüş güvenliğini riske atmaması adına, araç hareketlilik durumu, batarya seviyesi, ağ bağlantı kararlılığı gibi değişkenleri denetleyen kontrol algoritmalarının sistem mimarisine entegre edilmesi gerekmektedir [10]. Böylece güncellemelerin yalnızca güvenli koşullar altında gerçekleştirilmesi sağlanmıştır.



Şekil 2. OTA Servisleri (Araç) [22].

2. Uzaktan Teşhis Yetkinlikleri

Geleneksel otomotiv satış ve servis yapılarında, arızaların tespiti ve çözülmesi genellikle fiziksel servis noktalarında, teknisyenlerin doğrudan araç üzerindeki sistemlere bağlanmasıyla gerçekleştirilmektedir. Ancak çevrimiçi satış modeline geçişle birlikte, özellikle bayi bağımsız araç teslimatlarında veya mobil servis süreçlerinde, bu fiziksel temas sıklıkla mümkün olamamaktadır. Bu bağlamda, uzaktan teşhis altyapısı, yeni nesil araç mimarilerinin temel bileşenlerinden biri haline gelmiştir. Bayisiz satış modelinde, araçların servis gereksinimleri ve arıza durumları uzaktan takip edilmek zorundadır. Bu nedenle, E/E sistemlerin; arıza kodlarının merkezi sunuculara iletilmesini sağlayan, teknik destek birimlerinin araçla uzaktan bağlantı kurarak sistem parametrelerini okumasına ve gerektiğinde ön teşhis gerçekleştirmesine imkân tanıyan yeteneklere sahip olması gereklidir [11]. Uzaktan teşhisin güvenli ve kararlı bir biçimde gerçekleşebilmesi için, CAN-Bus, Ethernet ve OTA altyapılarının bulut tabanlı servislerle senkronize biçimde çalışması zorunludur. Bu sistem, araç içi kontrol ünitelerinin ve sensörlerin ürettiği yoğun verilerin zaman damgalı biçimde merkezi sistemlere aktarılmasını içerir. Böylece anlık veri analizi, hata kodlarının sınıflandırılması ve gerekli durumlarda yazılım temelli düzeltici müdahalelerin yapılması mümkün hâle gelmiştir. Bu yaklaşım, yalnızca kullanıcı deneyimini iyileştirmekle kalmaz, aynı zamanda servis maliyetlerini azaltmakta ve proaktif bakım stratejilerinin uygulanmasına olanak tanımaktadır.

3. Siber Güvenlik Mimarisinde Genişleme

Otomotiv sektöründe E/E sistemlerin giderek daha fazla dijitalleşmesi, araçların dış ortamları olan bağlantılarını artırmakta ve dolayısıyla potansiyel saldırı yüzeyini genişletmektedir. Özellikle çevrimiçi satış süreçleriyle entegre edilen OTA güncellemeler, sadece bilgi aktarımı değil, aynı zamanda sistem düzeyinde kritik işlemler (örneğin kontrol ünitesinin yeniden başlatılması, yazılım yükleme, parametre konfigürasyonu) içermekte olup, siber güvenlik açısından yüksek risk taşımaktadır [12]. Bu durum, siber güvenliğin artık yalnızca bilgi sistemlerinin değil, araç mimarisinin de temel bir tasarım bileşeni haline gelmesini zorunlu kılmıştır. Araç içi ağların korunması amacıyla şifreleme, kimlik doğrulama, ağ segmentasyonu ve güvenli yazılım güncelleme mekanizmaları gibi teknolojiler yaygın olarak benimsenmektedir. Ayrıca, anormallik tespiti ve gerçek zamanlı tehdit izleme sistemleri, bağlantılı araçların güvenlik açıklarını minimize etmek üzere devreye alınmaktadır. Yasal düzenlemeler de bu dönüşümü zorunlu hale getirmiştir. Özellikle ISO/SAE 21434 standardı ve UNECE WP.29 R155 regülasyonu, araç üreticilerine siber güvenlik risklerinin sistematik bir biçimde değerlendirilmesi, önlemlerin yazılım yaşam döngüsüne entegre edilmesi ve sürekli güncellenmesi zorunluluğunu getirmektedir. Bu çerçevede, modern araçlarda siber güvenlik, yalnızca yazılım seviyesinde değil; aynı zamanda donanım, iletişim altyapısı ve güncelleme süreçlerini kapsayan uçtan uca bir güvenlik mimarisi olarak ele alınmaktadır.

TEKNİK ZORLUKLAR VE FIRSATLAR

Otomotiv sektöründe çevrimiçi satış modeline geçiş, sadece ticari paradigmaları değil, aynı zamanda araçlardaki E/E sistemlerin mimari yapısını da köklü biçimde etkilemiştir. Üreticilerin bu yeni modele uyum sağlayabilmesi için hem donanım hem de yazılım düzeyinde kapsamlı dönüşümlere gitmeleri gerekmektedir. Elektrik-elektronik sistem fonksiyonlarının bu modele uyarlanması karşılaşılan başlıca zorluklar şunlardır:

- Farklı nesil donanımlara sahip araçlara aynı yazılım güncellemesini sunmak, özellikle eski nesil mimarilerde ciddi uyumluluk sorunlarına yol açabilmektedir. Modüler ve geri uyumlu yazılımların geliştirilmesi, hem donanım-yazılım arayüzlerini hem de OTA süreçlerinin güvenilirliğini etkileyen bir faktördür [13]. Bu uyumluluk gerekliliği, E/E sistemlerde donanım esnekliğini artıran yapıların geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır.
- Araçlardan sürekli olarak toplanan sistem verilerinin, merkezi sunuculara düşük gecikmeyle ve güvenli şekilde iletilmesi gerekmektedir. Ancak özellikle yüksek hacimli filo uygulamalarında, veri trafiğinin yoğunluğu ağ altyapısını zorlamakta ve veri bütünlüğünü tehdit etmektedir [14]. Aynı zamanda, araç çalışır durumdayken ve park halindeyken farklı veri protokollerinin devrede olması, yazılım katmanlarında karmaşıklık yaratmaktadır.
- Uzaktan erişim altyapılarının yaygınlaşması, siber saldırı yüzeyini genişletmekte ve araç sistemlerini potansiyel tehditlere açık hale getirmektedir. OTA ve uzaktan teşhis sistemleri üzerinden yapılacak müdahaleler, araç kontrol sistemlerini doğrudan etkileyebileceğinden, donanım destekli şifreleme, güvenli güncelleme ve tehdit algılama sistemlerinin entegre edilmesi büyük önem taşımaktadır [15].
- Her ülkenin farklı yasal düzenlemelere sahip olması, üreticilerin yazılım altyapılarını coğrafi bölgelere göre özelleştirmelerini gerektirmektedir. Özellikle Avrupa Birliği'nin UNECE WP.29 R155 (siber güvenlik) ve R156 (yazılım güncellemeleri) regülasyonları, bu dönüşümün temel belirleyicileri arasındadır [16]. Ancak bu regülasyonlara geçiş, hâlâ pek çok üretici için zorlu bir adaptasyon süreci olarak devam etmektedir.

- Servis istasyonlarında görevli teknik personelin yazılım odaklı sistemlere aşına olmaması, sistem güvenliğini ve sürdürülebilirliğini tehlikeye atmaktadır. OTA, siber güvenlik ve uzaktan teşhis konularında teknik personelin yeniden eğitilmesi, yalnızca insan kaynağı geliştirme değil, aynı zamanda sistemin güvenilirliği açısından da kritik bir zorunluluk haline gelmiştir [17].

Çevrimiçi araç satış modeline geçiş, bazı zorluklara yol açmakla birlikte, elektrik-elektronik sistemler açısından çok sayıda yeni fırsat da yaratmaktadır. Bu fırsatlar, hem üretici firmaların operasyonel verimliliğini artırmakta hem de kullanıcı deneyimini daha sürdürülebilir ve dijital odaklı hale getirmektedir. Bu fırsatlar başlıca boyutlarıyla şunlardır:

- Çevrimiçi satış modeliyle entegre edilen modern araçlar, sürüş esnasında sürekli veri üreten platformlara dönüşmektedir. Araç durum bilgileri, sürüş dinamikleri, bileşen performansı ve kullanıcı etkileşimleri gibi çok sayıda değişken, E/E sistemler aracılığıyla bulut tabanlı merkezlere iletilmektedir. Bu sayede üreticiler, tahmine dayalı bakım sistemleri, ürün tasarım optimizasyonu ve müşteri segmentasyonu gibi alanlarda veri odaklı karar alma süreçlerini güçlendirmektedirler [18].
- OTA mekanizmaları sayesinde üreticiler, araçları satıldıktan sonra bile fonksiyonel güncellemeler sunabilir hâle gelmektedir. Böylece bir aracın piyasaya sürülme süresi kısaltılabilir, çünkü bazı özellikler yazılım güncellemeleriyle sonradan eklenebilir. Bu yaklaşım, hem ürün yaşam döngüsü maliyetlerini azaltmakta, hem de müşteri memnuniyetini artırmaktadır [19].
- Uzaktan teşhis ve dijital bakım çözümleri, fiziksel servis noktalarının olmadığı ya da sınırlı olduğu bölgelerde bile etkili hizmet sunulmasını mümkün kılmaktadır. Böylelikle üreticiler, düşük operasyonel maliyetle daha geniş bir coğrafyada müşteri memnuniyetini sürdürebilmektedir. Bu yapı, özellikle bayısız satış yapan markalar için stratejik rekabet avantajı oluşturmaktadır [20].
- Çevrimiçi satış süreçleri, müşterilere önceden tanımlanmış sabit paketler yerine, ihtiyaca özel yapılandırma fırsatları sunmaktadır. E/E sistemlerin yazılım odaklı mimarisi sayesinde, belirli donanım bileşenleri yazılım güncellemesiyle aktifleştirilebilir hâle gelmektedir. Örneğin, bir ADAS modülü, fiziksel olarak araçta bulunsa da satış sonrasında yazılım üzerinden devreye alınabilir.
- Çevrimiçi satışa geçişle birlikte, geleneksel E/E mühendisliğinin ötesine geçilmekte; gömülü yazılım geliştirme, siber güvenlik, bulut entegrasyonu ve büyük veri analitiği gibi disiplinlerde yetkinlik sahibi mühendis profillerine ihtiyaç artmaktadır. Bu durum, üreticilere teknik kapasiteyi yeniden yapılandırma ve inovasyon kültürünü hızlandırma fırsatı sunmaktadır.

SONUÇ

Bu çalışma, otomotiv sektöründe hızla yaygınlaşan çevrimiçi satış modelinin, elektrik-elektronik (E/E) sistem fonksiyonları üzerindeki teknik ve yapısal etkilerini incelemiştir. Geleneksel bayilik yapısının yerini dijital satış platformlarına bırakması, yalnızca satış süreçlerinde değil, aynı zamanda araç tasarımı, yazılım mimarisi, servis altyapısı ve teknik personel profillerinde köklü değişiklikler meydana getirmektedir. Çevrimiçi satış yapısının gerektirdiği **OTA güncellemeleri, uzaktan teşhis altyapıları ve siber güvenlik sistemleri**, E/E mimarisinin artık yalnızca donanımsal bir yapı olmaktan çıkarak sürekli bağlantılı ve yazılım odaklı bir yapıya evrildiğini göstermektedir. Bu bağlamda, üretici firmaların sadece araç geliştirme süreçlerinde değil, aynı zamanda **ürün yaşam döngüsü yönetiminde** de E/E sistem yatırımlarını artırmaları kaçınılmaz görünmektedir. Araştırma sonucunda elde edilen bulgular, çevrimiçi satış modelinin iyi yapılandırıldığı takdirde kullanıcı deneyimini güçlendirdiğini, operasyonel verimliliği artırdığını ve sürdürülebilir mühendislik uygulamalarına zemin hazırladığını ortaya koymaktadır.

KAYNAKÇA

1. Anderson, C. (2022). *Digital Transformation in Automotive Distribution Channels*. Journal of Automotive Technology, 15(2), 45–58.
2. Müller, T. (2020). *The End of the Dealership Era? Impacts of Online Car Retailing*. Automotive Economics Review, 28(3), 117–132.
3. Smith, J., & Zhao, L. (2021). *EV Sales Models and the Direct-to-Consumer Paradigm*. International Journal of Electric Mobility, 9(1), 10–25.
4. Patel, R., & Kim, S. (2023). *Cybersecurity and Remote Services in Modern Automotive E/E Architectures*. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 72(4), 3610–3623.
5. KPMG. (2021). *Global Automotive Executive Survey 2021*.
6. Deloitte. (2022). *The Future of Automotive Retail – Embracing the Digital Shift*.
7. PwC. (2020). *Digital Auto Report: The Age of Digitization in the Automotive Industry*.
8. McKinsey & Company. (2020). *How Online Channels Are Reshaping Car Sales in a Post-COVID World*.
9. Chien, Y., & Cheng, H. (2021). *Design Considerations for OTA in Automotive Systems*. SAE Technical Paper.
10. Lin, J., et al. (2022). *Vehicle Software Updates: Safety and Validation Methods*. IEEE Access, 10, 48754–48768.
11. Bosch. (2020). *Remote Diagnostics – From Workshop to Cloud*. Technical White Paper.
12. ISO/SAE 21434 (2021). *Road Vehicles – Cybersecurity Engineering*. International Organization for Standardization.
13. Liu, M., & Patel, D. (2022). *Legacy Hardware Compatibility in Automotive OTA Systems*. SAE Transactions.
14. Ericsson. (2021). *Low Latency Vehicle-to-Cloud Communication Architecture*. White Paper.
15. Checkoway, S., et al. (2020). *Comprehensive Cybersecurity for Connected Vehicles*. IEEE Vehicular Technology Magazine, 15(1), 24–31.
16. UNECE. (2021). *R155 & R156 Regulations on Cybersecurity and Software Updates*. United Nations Economic Commission for Europe.

17. Bosch Engineering. (2023). *Re-Skilling Automotive Technicians for the Digital Age*. Technical Insights.
18. Khandoker, M., et al. (2022). *Big Data Applications in Automotive Predictive Maintenance*. IEEE Access, 10, 113217–113229.
19. Tavares, D., & Han, L. (2021). *OTA as a Strategy for Continuous Vehicle Improvement*. Journal of Vehicle Software Engineering, 5(2), 87–98.
20. Roland Berger. (2020). *Future Automotive Aftermarket: Global Opportunities via Digitization*. Industry Report.
21. SAE International. (2023). *Engineering Competencies for Software-Defined Vehicles*. Position Paper.
22. Iyieke, V., Jadidbonab, H., Rakib, A., Bryans, J., Dhaliwal, D., & Kosmas, O. (2025). An adaptable security-by-design approach for ensuring a secure Over the Air (OTA) update in modern vehicles. *Computers & Security*, 150, 104268.

Standard Diagnostic Tools In The Automotive Industry

Gurkan ERTUGRAL¹, Meltem SUPURTULU²

¹E-mail: gurkan.ertugral@tofas.com.tr; TOFAS R&D Center, Turkish Automobile Factory,
Bursa/Türkiye, 0009-0007-8077-7512

²E-mail: meltem.supurtulu@tofas.com.tr; TOFAS R&D Center, Turkish Automobile Factory,
Bursa/Türkiye, ORCID: 0000-0003-0473-7731.

Abstract

Modern vehicles are increasingly defined by Electronic Control Units (ECUs) and software-based architectures, making On-Board Diagnostics (OBD) tools essential to their operation and maintenance. These systems ensure compatibility across manufacturers while enabling efficient fault detection, repair planning, and compliance with emission regulations. Their progression from basic OBD-II scanners to advanced cloud-based platforms reflects a broader transformation from simple Diagnostic Trouble Code (DTC) retrieval toward predictive diagnostics and lifecycle management. By providing a common framework for interpreting DTCs and live data, standardized tools reduce training requirements, foster interoperability, and improve service efficiency across the industry. This paper reviews the evolution and current use of diagnostic standards such as Unified Diagnostic Services (UDS) and Diagnostics over Internet Protocol (DoIP), highlights categories of tools and their functionality, and discusses major challenges including rising system complexity, cybersecurity risks, and the shift to electrified powertrains. Future directions emphasize Artificial Intelligence (AI), remote diagnostics, and Over-the-Air (OTA) applications as enablers of proactive vehicle health management.

Keywords: Automotive electronics, cybersecurity, diagnostic protocols, OBD-II, predictive maintenance, UDS.

INTRODUCTION

Over the past three decades, the automotive industry has undergone a profound transformation driven by digitalization and electrification. Modern vehicles often integrate more than one hundred Electronic Control Units (ECUs), which govern engine performance, safety functions, comfort features, and connectivity services (Cheah et al., 2018). As vehicle architectures have grown increasingly complex, the demand for efficient and standardized diagnostic protocols has become critical.

Diagnostic systems serve multiple purposes. Beyond accelerating repair and maintenance, they are essential for ensuring compliance with environmental regulations, safeguarding functional safety, and

mitigating cybersecurity threats. The progression from On-Board Diagnostics I (OBD-I) to On-Board Diagnostics II (OBD-II) marked a turning point in the history of diagnostics, enabling universal fault code retrieval across manufacturers (McCord, 2006). Introduced as mandatory in the United States in 1996, OBD-II was initially designed to monitor emissions but has since evolved into a global diagnostic platform (Onori, Serrao, & Rizzoni, 2016). Building on this foundation, advanced frameworks such as Unified Diagnostic Services (UDS; ISO 14229) and Diagnostics over Internet Protocol (DoIP; ISO 13400) extend capabilities beyond emission-related functions, supporting in-vehicle communication and remote diagnostic operations (Wenzel, Krueger, & Rottmann, 2018).

This study aims to review the evolution and application of standardized diagnostic tools in the automotive sector, with emphasis on their technical, operational, and regulatory dimensions. The remainder of this paper is organized as follows: Section 2 examines diagnostic standards and protocols; Section 3 discusses hardware and software tools; Section 4 outlines the broader significance of diagnostic systems; Section 5 identifies current challenges and research directions; and Section 6 explores future perspectives.

LITERATURE REVIEW

The OBD system originated in the late 1980s as part of emission control policies in the United States. The transition from OBD-I to OBD-II represented a significant milestone in the development of standardized fault code retrieval and universal compatibility across manufacturers (McCord, 2006). The second-generation standard, OBD-II, became mandatory in 1996, allowing access to Diagnostic Trouble Codes (DTCs) that provide information on emission-related faults (Onori et al., 2016). Regional adaptations such as European OBD (EOBD) and Japanese OBD (JOBD) followed, establishing OBD-II as a global platform for basic diagnostic functions. While its early applications were limited to emission monitoring, OBD-II rapidly evolved into a general-purpose diagnostic tool widely used in service and maintenance (Hauschildt & Mueller, 2014).

As ECUs multiplied and became more sophisticated, the limitations of OBD-II became evident. This led to the development of Unified Diagnostic Services (UDS), standardized under ISO 14229 (Figure 1). UDS covers a wide range of diagnostic tasks, including ECU reset, memory access, security authentication, and execution of manufacturer-specific routines (ISO, 2013). Its modular structure allows OEMs to define additional diagnostic services while maintaining interoperability across platforms, making it the dominant diagnostic standard for modern vehicles (Wagner et al., 2017).

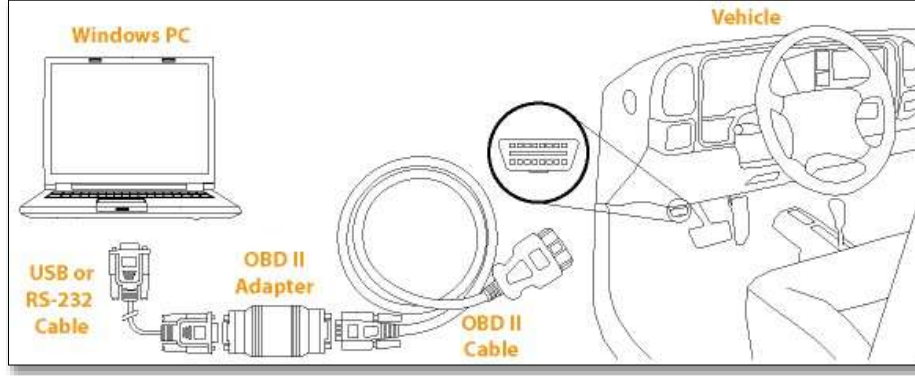


Figure 1. On-Board Diagnostics II (OBD-II) systems (Web 1).

The transition to electric and connected vehicles has created the need for higher bandwidth and faster communication protocols. Diagnostics over IP (DoIP), defined in ISO 13400, uses Ethernet communication to support high-volume data transfers and advanced functions such as software updates and over-the-air (OTA) diagnostics (Wenzel et al., 2018). By leveraging existing IP-based infrastructure, DoIP enables scalable diagnostic solutions that align with the industry's shift toward software-defined vehicles.

Recent developments have moved vehicle diagnostics beyond traditional fault code retrieval toward predictive diagnostics enabled by artificial intelligence and machine learning. These approaches process ECU data streams to identify degradation patterns and forecast failures before they occur, thereby supporting proactive maintenance strategies. In parallel, digitized diagnostic platforms have demonstrated their ability to enhance fault detection efficiency and promote standardization across different vehicle systems (Oluwaseyi & Sunday, 2020). At the same time, cybersecurity has emerged as a pressing concern. Initiatives such as EVITA (E-safety Vehicle Intrusion Protected Applications) and Secure Onboard Communication have been developed to safeguard diagnostic sessions from malicious interference (Ruddle, Wiedemann, & Dittmann, 2009).

Additionally, with the increasing demand for validation of diagnostic protocols in research and development environments, engineering tools such as Vector CANalyzer have become essential. CANalyzer supports multiple communication protocols including CAN, LIN, FlexRay, and Ethernet/DoIP, enabling engineers to monitor raw bus traffic, analyze Diagnostic Trouble Codes (DTCs), record message streams, and simulate ECU communication scenarios. For instance, CANalyzer allows the execution of UDS diagnostic services such as *ReadDataByIdentifier* or *ReadDTCInformation*, providing insights into system responses in real time. Its application in both laboratory and on-road testing highlights its importance not only as a diagnostic tool but also as a validation platform for advanced ECUs and diagnostic standards (Liu & Sun, 2019).

DIAGNOSTIC TOOLS

Diagnostic tools can be categorized both by their structural design and by their functional scope. At the structural level, they are typically divided into hardware interfaces and software platforms, which

together enable communication with ECUs, fault detection, parameter monitoring, and in many cases, remote diagnostic capabilities. From a functional perspective, diagnostic tools can be further classified into three tiers. Universal scanners represent the most basic category, primarily designed to read and clear diagnostic trouble codes while offering access to limited sensor data. Advanced diagnostic systems extend this functionality by interfacing with multiple ECUs, thereby supporting calibration, adaptation, and in-depth testing of vehicle functions. At the highest level, professional multi-system tools combine wide vehicle coverage with advanced diagnostic capabilities, making them particularly valuable in independent workshops that service diverse brands and models. This combined structural and functional stratification illustrates how diagnostic solutions vary not only in terms of hardware–software architecture but also in their depth of access, vehicle coverage, and operational complexity within the automotive ecosystem (Figure 2).

The hardware component of diagnostics is primarily based on Vehicle Communication Interfaces (VCIs). These devices act as gateways between the vehicle’s communication bus (CAN, LIN, FlexRay, or Ethernet) and the diagnostic software installed on a computer or server. Commercially available VCIs are produced by companies and are widely used in both OEM development and aftersales service (Karnouskos, 2017).

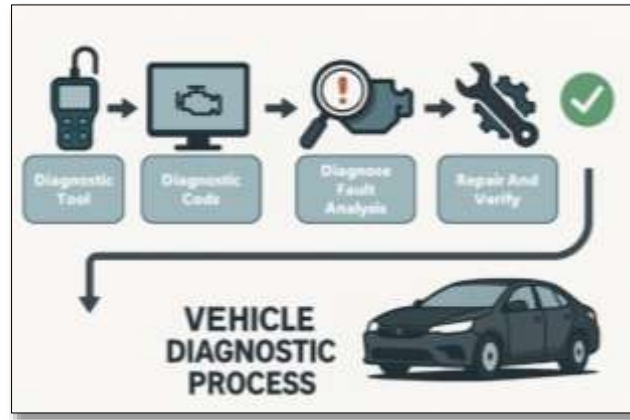


Figure 2. Diagnostic process of vehicle.

Software platforms interpret diagnostic messages and provide user interfaces that support technicians and engineers in analyzing vehicle performance. These platforms can generally be grouped into three categories. The first category consists of proprietary diagnostic tools, which are typically developed to provide comprehensive access to ECU functions, including guided fault finding, system adaptation, and firmware flashing (Mao et al., 2020). The second group includes generic diagnostic applications, which are widely available and primarily support basic functions such as reading and clearing fault codes or monitoring emission-related parameters; however, their scope remains limited compared to proprietary solutions (Hauschildt & Mueller, 2014). Finally, engineering and validation platforms are employed mainly in research and development contexts, offering advanced features such as system-level testing, calibration, scripting, and automation. These platforms play a critical role in validating diagnostic protocols and supporting complex integration tasks across multiple vehicle systems (Karnouskos, 2017).

Among engineering tools, CANalyzer represents a prominent example of a professional validation platform. Unlike universal scanners, CANalyzer provides capabilities such as:

- **Real-time bus traffic monitoring:** Engineers can observe CAN, LIN, and Ethernet messages to identify anomalies in ECU communication.
- **Script and automation support:** Using CAPL (CAN Access Programming Language), custom diagnostic functions can be programmed. For example, periodic UDS requests like *ReadDataByIdentifier (0x22)* can be sent automatically to measure ECU response times.
- **Fault injection and simulation:** CANalyzer can simulate corrupted frames, missing messages, or unusual load conditions to validate ECU robustness.
- **Diagnostic session management:** Engineers can trigger UDS services such as *SecurityAccess*, *RoutineControl*, or *SoftwareDownload* directly via CANalyzer’s diagnostic console.

For instance, during the validation of a Transmission Control Unit (TCU), CANalyzer can be employed to transmit Unified Diagnostic Services (UDS) “Read DTC Information (0x19)” requests. As illustrated in Figure 3, the diagnostic responses—typically encoded in hexadecimal format—are automatically parsed and subsequently presented both in raw and human-readable representations. This functionality facilitates a detailed and accurate assessment of fault memory management. Such a depth of diagnostic access, which exceeds the capabilities of conventional service-level scanners, underscores CANalyzer’s significance as an advanced platform for comprehensive ECU diagnostic testing and validation workflows.

With the increasing connectivity of modern vehicles, remote diagnostics has emerged as a critical area of development. In such systems, diagnostic data are transmitted from the vehicle to cloud-based platforms, where they can be processed and analyzed to support maintenance and operational decisions. These platforms typically integrate diagnostic information with telematics services, predictive analytics, and OTA update frameworks, thereby forming the basis of next-generation maintenance strategies (Kohli & Arora, 2021). However, the adoption of remote diagnostics also introduces new challenges, particularly with respect to data security, communication bandwidth, and the need for international standardization. To address these issues, advanced communication protocols such as DoIP and secure data transmission methods are increasingly being incorporated into diagnostic architectures, ensuring both reliability and cybersecurity compliance in connected vehicle environments (Wenzel, Krueger, & Rottmann, 2018).

Figure 3. Visualization of a CANalyzer session during validation.

THE IMPORTANCE OF STANDARDIZED DIAGNOSTIC SYSTEMS

Standardized diagnostic systems are fundamental to the modern automotive ecosystem, providing benefits across technical, operational, and regulatory dimensions. Beyond fault detection, diagnostic tools also contribute to emission control checks, maintenance planning, software updates, and safety validations. In practice, they save both time and resources by quickly identifying the root causes of warning lights or irregular vehicle behavior. Their significance can be understood from four primary perspectives:

Diagnostic protocols such as OBD-II, UDS, and DoIP enable faster and more reliable identification of system faults. Standardized tools reduce the time required for technicians to locate issues, which directly lowers repair costs and increases vehicle availability (Hauschildt & Mueller, 2014). In commercial fleets, this translates to improved uptime and reduced operational disruptions. Furthermore, standardized diagnostics minimize the need for multiple proprietary tools, creating efficiencies in both workshop and aftermarket contexts (Mao, Zhang, & Chen, 2020).

Emissions regulations, safety directives, and cybersecurity mandates increasingly require the use of standardized diagnostic interfaces. OBD-II compliance, for example, is mandatory in the United States and Europe for ensuring emissions conformity (Onori, Serrao, & Rizzoni, 2016). Similarly, diagnostic access forms part of UNECE WP.29 cybersecurity and software update regulations, where the ability to monitor and verify software integrity is directly tied to standardized protocols (UNECE, 2020).

Standardized systems foster interoperability between OEMs, suppliers, service providers, and independent repair shops. Without common diagnostic frameworks, each stakeholder would require unique hardware and software combinations, significantly increasing costs and complexity (Karnouskos, 2017). At the foundation of modern diagnostic practices lies a set of international standards that ensure compatibility across vehicle makes and models. These standards allow DTCs and live data streams to be communicated in a common language, regardless of the manufacturer. As a result,

workshops and technicians can adopt unified approaches to analyzing malfunctions, which reduces training requirements, enhances service efficiency, and facilitates collaboration in research, testing, and cross-border servicing. Ultimately, such frameworks ensure that essential diagnostic information remains accessible and usable throughout the vehicle's life cycle, while enabling OEM-specific extensions to coexist within a harmonized system.

With the rise of connected vehicles, diagnostic channels have become potential entry points for cyberattacks. Unauthorized access to diagnostic functions could allow malicious actors to manipulate ECUs or disable safety-critical systems (Checkoway et al., 2011). Standardized diagnostic frameworks increasingly integrate security mechanisms, such as challenge–response authentication in UDS or encrypted channels in DoIP, to mitigate these risks (Ruddle, Wiedemann, & Dittmann, 2009). Ensuring cybersecurity within diagnostics is therefore essential not only for protecting vehicle integrity but also for safeguarding public safety.

CURRENT CHALLENGES AND RESEARCH DIRECTIONS

The central challenge for the automotive industry lies in the growing complexity of electronic and software-based systems. As vehicles evolve, diagnostic tools must also adapt. Electric and hybrid vehicles, for example, demand new diagnostic capabilities in areas such as battery management and high-voltage circuit monitoring. Despite their widespread adoption, standardized diagnostic systems face several challenges in adapting to the evolving landscape of automotive technology. These challenges can be grouped into four major areas:

Modern vehicles can integrate over 100 ECUs, each generating large amounts of diagnostic and operational data (Cheah, Lee, & Lee, 2018). Managing, filtering, and analyzing this data in real time remains a significant challenge. While protocols such as UDS and DoIP provide structured access, the sheer volume of signals often overwhelms both workshop tools and remote diagnostic systems. Future research must focus on scalable data management strategies and efficient compression techniques to ensure timely fault detection.

From a validation and development perspective, CANalyzer addresses challenges related to data volume by enabling high-rate bus logging across multiple protocols (CAN, LIN, FlexRay, and Ethernet) with time-synchronized traces, configurable filters, and trigger-based capture (e.g., initiating recording upon detection of a UDS NegativeResponse). In addition, engineers can employ CAPL scripting to selectively extract relevant signals, compute derived parameters (such as wheel-speed differentials), and export only the most salient data windows for subsequent cloud-based analysis. Furthermore, replay functionality allows for deterministic reproduction of field logs on Hardware-in-the-Loop (HiL) test benches, thereby supporting reproducible fault detection and debugging without the necessity of storing full-day trace files.

Electric vehicles (EVs) and hybrid electric vehicles (HEVs) introduce unique diagnostic requirements. For example, battery management systems (BMS) require specialized fault detection methods, such as monitoring state of health (SOH), state of charge (SOC), and thermal stability (Onori et al., 2016).

Unlike internal combustion engines, failures in high-voltage systems may not manifest through standard DTCs, necessitating new diagnostic frameworks. Research is ongoing to integrate electrochemical models and predictive algorithms into standardized diagnostic protocols.

Within EV programs, CANalyzer's Diagnostics over IP (DoIP) and Ethernet capabilities, together with its UDS service panels, provide functionality for polling BMS data objects (e.g., cell voltages and temperatures via the ReadDataByIdentifier service). The tool further enables the execution of RoutineControl procedures for balancing tests and allows synchronization of these data with chassis and safety ECU messages within a unified interface. Moreover, CAPL scripting facilitates the orchestration of charge-cycle experiments by issuing Charging State requests, logging ISO 15118/PLC gateway communications, and detecting early indicators of thermal runaway when gradient thresholds are exceeded. In this manner, CANalyzer effectively bridges standardized diagnostic protocols with the specific observability requirements of EV applications.

As vehicles become more connected through telematics and V2X communication, diagnostic interfaces represent potential attack vectors (Checkoway et al., 2011). Unauthorized access could allow attackers to reprogram ECUs, disable safety functions, or manipulate diagnostic data. Although UDS and DoIP include security mechanisms, these remain vulnerable to advanced intrusion techniques. Current research directions include the integration of ISO/SAE 21434 cybersecurity engineering standards into diagnostic workflows and the application of blockchain-based authentication for secure access (Nakamura et al., 2020).

In the context of security testing, CANalyzer facilitates the validation of protected UDS sequences (e.g., SecurityAccess seed/key exchanges) by enabling verification that ECUs correctly enforce timing constraints, lockout counters, and role-based access permissions. The platform further supports controlled security evaluations through the injection of malformed frames and the execution of replay attacks, thereby allowing assessment of ECU robustness without compromising production systems. In addition, the use of secure tunneling (e.g., TLS for DoIP gateways) can be confirmed to ensure diagnostic data integrity. Annotated traces generated during these tests provide documentation for ISO/SAE 21434 compliance, while CAPL scripting enables fuzz testing of edge cases in a reproducible and controlled environment.

Traditional diagnostic systems are reactive, identifying faults only after they occur. The industry is moving toward predictive diagnostics, where artificial intelligence (AI) and machine learning (ML) models analyze ECU data to forecast failures before they impact vehicle performance. For example, anomaly detection algorithms can identify deviations in sensor signals, allowing for early interventions in critical components such as braking systems or battery packs (Zhang et al., 2021). Ongoing research focuses on embedding these predictive models into standardized frameworks, ensuring interoperability while maintaining accuracy.

From the perspective of predictive diagnostics, CANalyzer functions as a high-fidelity data acquisition and orchestration layer. Through CAPL or Python bridges, the platform is capable of computing on-the-fly features (e.g., moving variance, residuals from nominal maps) and generating real-time alerts within

the user interface. The logged datasets—time-aligned across multiple communication buses—can subsequently be exported for the training of machine learning models and re-imported for “model-in-the-loop” validation, wherein CANalyzer compares live traffic against model-based expectations and highlights deviations. This iterative workflow significantly accelerates the transition from research-oriented algorithms to deployable and standards-compliant diagnostic solutions.

FUTURE PERSPECTIVES

The evolution of diagnostic systems is closely linked to broader transformations in the automotive industry, particularly the shift toward electrification, connectivity, and software-defined vehicle architectures. Several trends are expected to shape the future of standardized diagnostics:

Digital twin technology enables the creation of virtual replicas of physical vehicles, allowing continuous monitoring and simulation of system performance. When integrated with diagnostic frameworks, digital twins can provide real-time insights into degradation, stress factors, and potential failures (Tao et al., 2019). This will allow predictive diagnostics to move beyond pattern recognition toward simulation-based fault forecasting.

As connectivity becomes a core feature of modern vehicles, cloud-based diagnostics are expected to become the norm. Diagnostic data will increasingly be transmitted to centralized platforms where advanced analytics and AI models can detect anomalies at scale (Kohli & Arora, 2021). This approach enables OEMs and fleet operators to perform remote monitoring, reduce service center visits, and schedule maintenance proactively. However, such systems will also require robust cybersecurity frameworks to ensure the confidentiality and integrity of diagnostic data.

Future diagnostic systems are expected to shift from reactive or even predictive approaches toward proactive diagnostics, where the system autonomously triggers maintenance actions before failures occur (Zhang, Chen, & Mao, 2021). For instance, an ECU might automatically request an OTA update or initiate a safe operating mode if a failure trend is detected. This level of autonomy will require integration of diagnostics with vehicle control strategies, raising questions about safety certification and liability.

Artificial intelligence is likely to become embedded within diagnostic standards themselves. Machine learning models, particularly deep learning and anomaly detection algorithms, can process large-scale data from ECUs, sensors, and telematics systems. Future versions of standards such as UDS and DoIP may incorporate frameworks for transmitting AI-derived diagnostic results rather than raw sensor data, ensuring interoperability across different manufacturers.

Finally, cybersecurity will remain a dominant concern. The adoption of ISO/SAE 21434 and UNECE WP.29 regulations marks the beginning of a systematic integration of cybersecurity into diagnostics. In the future, diagnostic systems may evolve into secure, unified platforms where access, authentication, and data transfer are governed by standardized cryptographic methods (Nakamura et al., 2020). This

will be essential for enabling safe remote diagnostics, OTA updates, and cooperative vehicle-to-cloud communication.

CONCLUSION

The increasing complexity of modern vehicles, driven by electrification, connectivity, and software integration, has made standardized diagnostic systems indispensable. Protocols such as OBD-II, UDS, and DoIP provide the foundation for efficient fault detection, regulatory compliance, and interoperability across manufacturers and service providers. Their adoption has not only streamlined repair and maintenance processes but also ensured alignment with emissions legislation, safety standards, and emerging cybersecurity frameworks. Despite these achievements, several challenges remain. The exponential growth of ECU data, the unique requirements of electric vehicle diagnostics, and vulnerabilities in connected vehicle infrastructures underscore the need for continued research. At the same time, artificial intelligence and predictive maintenance approaches are opening new opportunities for proactive and autonomous diagnostics, which could fundamentally reshape vehicle health management. Looking ahead, diagnostic systems are expected to evolve toward cloud-based platforms, digital twin integration, and AI-enhanced analysis. These advancements will enable predictive and proactive maintenance strategies while reinforcing cybersecurity protections. Ultimately, the success of future diagnostic systems will depend on the balance between innovation and standardization, ensuring that they remain interoperable, secure, and capable of supporting the next generation of software-defined vehicles.

References

- Cheah, M., Lee, H., & Lee, J. (2018). Security and update management in connected vehicles. *Automotive Systems Journal*, 12(3), 45–56.
- Checkoway, S., McCoy, D., Kantor, B., Anderson, D., Shacham, H., Savage, S., ... Koscher, K. (2011). Comprehensive experimental analyses of automotive attack surfaces. *USENIX Security Symposium*, 20(1), 447–462.
- European Commission. (2007). *Regulation (EC) No 715/2007 of the European Parliament and of the Council of 20 June 2007 on type approval of motor vehicles with respect to emissions from light passenger and commercial vehicles (Euro 5 and Euro 6)*. Official Journal of the European Union.
- Hauschildt, D., & Mueller, R. (2014). The evolution of on-board diagnostics: From emission control to full vehicle monitoring. *Automotive Engineering Review*, 22(1), 33–41.
- International Organization for Standardization. (2013). *Road vehicles — Unified diagnostic services (UDS) — ISO 14229*. Geneva: ISO.
- Karnouskos, S. (2017). Automotive software and the Internet of Things: Challenges and opportunities. *IEEE Software*, 34(3), 92–96.
- Kohli, R., & Arora, A. (2021). Remote diagnostics and predictive maintenance in connected vehicles. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 25(4), 310–325.

- Liu, Y., & Sun, H. (2019). Comparative study of OEM diagnostic tools for automotive maintenance. *International Journal of Automotive Technology*, 20(6), 1135–1145.
- Mao, Q., Zhang, Y., & Chen, L. (2020). Development and application of OEM diagnostic platforms. *SAE International Journal of Passenger Cars – Electronic and Electrical Systems*, 13(2), 145–153.
- McCord, K. (2006). *Automotive diagnostic systems: Understanding OBD I & OBD II*. Delmar Cengage Learning.
- Nakamura, T., Yamamoto, K., & Takahashi, S. (2020). Blockchain-based authentication for secure automotive diagnostics. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 69(11), 13245–13257.
- Oluwaseyi, M. M., & Sunday, A. M. (2020). Specifications and analysis of digitized diagnostics of automobiles: A case study of on-board diagnostic (OBD II). *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 9(1), 1377–1383. <https://doi.org/10.17577/IJERTV9IS010583>
- Onori, S., Serrao, L., & Rizzoni, G. (2016). *Hybrid Electric Vehicles: Energy Management Strategies*. Springer.
- Ruddle, A., Wiedemann, R., & Dittmann, M. (2009). EVITA project: Securing automotive on-board communication. *Proceedings of the ESCAR Conference*, 32–40.
- SAE International. (2015). *J1979: E/E diagnostic test modes*. Warrendale, PA: SAE International. https://doi.org/10.4271/J1979_201502.
- Tao, F., Zhang, H., Liu, A., & Nee, A. Y. C. (2019). Digital twin in industry: State-of-the-art. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 15(4), 2405–2415.
- UNECE. (2020). *UN Regulation No. 155: Cybersecurity and Cybersecurity Management Systems*. Geneva: United Nations Economic Commission for Europe.
- Wagner, J., Schmidt, H., & Keller, T. (2017). Standardized diagnostic services for next-generation vehicles. *SAE Technical Paper Series*.
- Web 1, <https://x-engineer.org/on-board-diagnostics-obd-modes-operation-diagnostic-services>
- Wenzel, T., Krueger, M., & Rottmann, P. (2018). Diagnostics over IP: Implementation and future perspectives. *SAE International Journal of Passenger Cars – Electronic and Electrical Systems*, 11(2), 95–104.
- Zhang, Y., Chen, L., & Mao, Q. (2021). Artificial intelligence in predictive automotive diagnostics: Challenges and opportunities. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 32(4), 987–1002.

A Brief Review of OTA-Based Vehicle Developments In The Automotive

Mehmet Berhan BAY¹, Meltem SUPURTULU²

¹E-mail: mehmet.berhanbay@tofas.com.tr; TOFAS R&D Center, Turkish Automobile Factory, Bursa/Türkiye, ORCID: 0009-0009-7544-5585.

²E-mail: meltem.supurtulu@tofas.com.tr; TOFAS R&D Center, Turkish Automobile Factory, Bursa/Türkiye, ORCID: 0000-0003-0473-7731.

Abstract

The digital transformation of the automotive industry has accelerated the integration of Over-the-Air (OTA) technology, enabling remote software delivery, security patching, and functional upgrades without requiring physical access to vehicles. Initially utilized for infotainment systems, OTA has now become a critical component for updating safety-critical Electronic Control Units (ECUs) and supporting software-defined vehicle architectures. This paper presents a structured review of OTA developments in the automotive domain, outlining key update strategies including full image, delta, and container-based updates. It also compares two prevailing OTA frameworks—OMA-DM and Uptane—highlighting their terminology, architecture, and security approaches. Key challenges such as cybersecurity vulnerabilities, energy efficiency (especially in electric vehicles), and software versioning complexities are discussed alongside best practices for robust deployment. Finally, the study identifies future research directions, including AI-assisted update scheduling and blockchain-secured OTA ecosystems.

Keywords: AI-assisted update, electric vehicles, Electronic Control Units (ECUs), Over-the-Air (OTA).

INTRODUCTION

The automotive sector is undergoing a fundamental transformation, driven by digitalization, increased connectivity, and the emergence of software-defined vehicles. In this new paradigm, Over-the-Air (OTA) technology has become a key enabler, allowing manufacturers to remotely deliver software updates, fix security vulnerabilities, and introduce new features—without requiring physical vehicle access. Originally adopted in consumer electronics, OTA has now evolved to serve critical automotive domains such as ADAS, powertrain, and safety ECUs. Modern vehicles may contain dozens of ECUs connected via CAN or LIN networks. These units are responsible for essential functions and are developed using structured models like the V-model, adhering to safety (ISO 26262) and cybersecurity (SAE J3061, ISO 21434) standards. The complexity of these systems and the shift from mechanical to digital components have dramatically increased the lines of code per vehicle, now

exceeding tens of millions. Consequently, OEMs carry a growing responsibility for maintaining in-vehicle software integrity throughout the vehicle's lifecycle. A significant number of vehicles recalls in recent years have been linked to software malfunctions. The OEM emissions case exemplifies how remote OTA updates could have significantly reduced cost, time, and environmental impact compared to mass physical recalls. In this context, OTA is not merely a convenience but a strategic asset for lifecycle management. However, OTA systems also introduce novel cybersecurity risks. Attack vectors such as OBD-II ports, Bluetooth, and Wi-Fi interfaces can be exploited to inject malicious code, steal firmware, or even remotely control vehicle functions. Thus, secure OTA deployment must include encrypted communication, robust authentication, version verification, and rollback mechanisms. As vehicles continue to depend more heavily on software, ensuring secure, efficient, and scalable OTA infrastructure is critical. Recent studies emphasize the need for rigorous threat modeling and adaptable architectures to meet the growing demands of software versioning, update prioritization, and user experience. This review aims to synthesize the state-of-the-art in OTA development and offer guidance on best practices and implementation strategies for OEMs, researchers, and regulators (Iyieke et al., 2025).

ARCHITECTURAL AND FUNCTIONAL OVERVIEW OF AUTOMOTIVE OTA SYSTEMS

1. Overview of OTA Impact in Automotive

The automotive industry is rapidly evolving with trends such as automation, electrification, and connectivity. This transformation has led to the integration of over 100 ECUs and millions of lines of software code in modern vehicles, increasing the need for secure and scalable update mechanisms. Traditional in-service updates are no longer sufficient for managing this complexity. OTA technology has emerged as a solution, enabling wireless delivery of firmware (FOTA) and software (SOTA) updates to vehicles. OTA provides advantages such as reduced maintenance costs, remote bug fixes, performance enhancements, and user-focused feature upgrades. OTA systems consist of an Off-board (cloud servers, mobile networks) and On-board (ECUs, telematics units) structure (Fig.1). Together, they form a comprehensive ecosystem that allows for the generation, distribution, and execution of updates. Prior frameworks like EVITA, SFOTA, and UniSUF have addressed key security and architectural challenges in this domain.

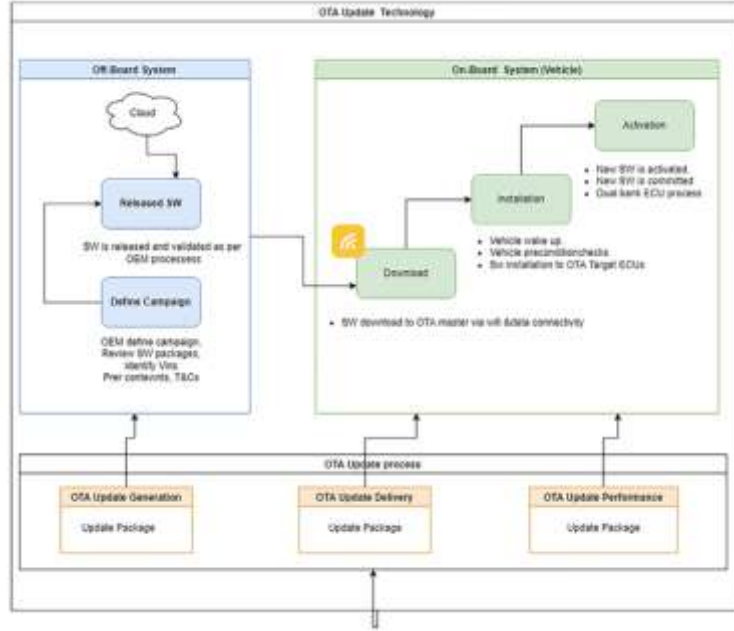


Figure 1. OTA systems update process (Iyieke et al., 2025).

2. On-board System Design

In the OTA update architecture, the on-board system encompasses all in-vehicle components and processes involved in managing and executing software updates (Fig. 2). Typically, these updates are applied to various ECUs within domains such as infotainment, telematics, or sensor systems. In line with common classification approaches, ECUs within the vehicle are often grouped into two functional roles: the OTA Master ECU, which coordinates the update process, and the OTA Target ECUs, which receive and install the updates (Sharma et al., 2005). According to the Open Mobile Alliance (OMA) standards, the OTA update cycle generally follows a three-stage model: *download*, *install*, and *activate* (Zandberg et al., 2019). However, OTA target ECUs are typically excluded from the downloading phase to reduce system complexity and enhance security. This architectural separation ensures that the more resource-constrained or safety-critical ECUs are only engaged during the installation and activation steps, while the downloading of update packages is handled by a more capable and network-connected master ECU. Consequently, the design of on-board OTA systems should prioritize the decoupling of download functions from OTA target ECUs while still ensuring compatibility with their software installation and activation requirements. This separation contributes to the modularity, robustness, and maintainability of the in-vehicle OTA framework.

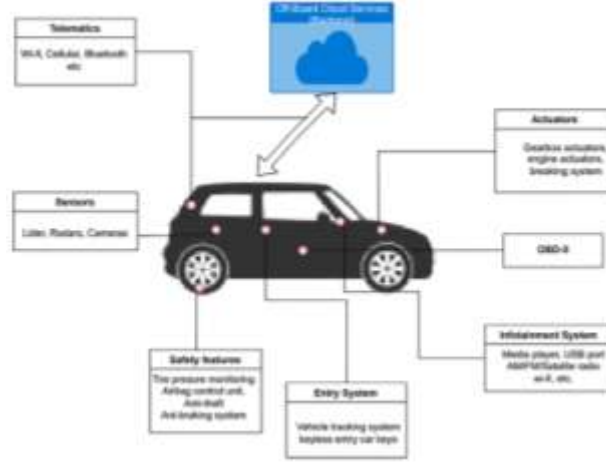


Figure 2. OTA On-board system (Vehicle) (Iyieke et al., 2025).

3. Off-Board System and Cloud Integration

As vehicles continue to evolve into software-centric platforms, the off-board domain—particularly cloud infrastructure—plays a pivotal role in enabling scalable and continuous software delivery (Fig. 3). Recent developments in both industry and academia highlight the increasing emphasis on designing cloud-based architectures that support seamless, secure, and remote update deployment across vehicle fleets (Ebert & Favaro, 2017). With the convergence of embedded systems and the Internet of Things (IoT), the automotive landscape is being reshaped by both traditional OEMs and new digital entrants such as Google, who influence the design of in-vehicle software and connected components (He et al., 2014). In this new paradigm, the cloud serves as a backbone for managing virtualized data resources and orchestrating software services that extend beyond the physical boundaries of the vehicle. The Off-board OTA system consists of a range of backend services hosted in the cloud, which are responsible for generating, validating, and distributing update packages. These servers maintain a digital instance of each vehicle, enabling real-time monitoring, version control, and over-the-air firmware deployment. Once an update package (FOTA or SOTA image) is prepared, it is transmitted to the vehicle via wireless communication technologies such as 3G, 4G, 5G, or Wi-Fi, depending on network availability and bandwidth requirements. Through this architecture, OEMs are empowered not only to manage software updates at scale but also to offer value-added services such as diagnostics, predictive maintenance, and personalized feature activation—all managed remotely through cloud platforms. Thus, the off-board system is an indispensable component of the end-to-end OTA framework, bridging the backend infrastructure with the in-vehicle execution environment.



Figure 3. OTA offboard services (Iyieke et al., 2025).

4. OTA Terminology: OMA-DM and Uptane

The implementation of OTA updates in the automotive sector often references two prominent frameworks: OMA Device Management (OMA-DM) and Uptane. While both serve similar objectives, reliable and secure remote software delivery—they differ significantly in their focus and terminology (Fig. 4).

4.1. OMA-DM Based OTA Architecture

OMA-DM provides a standardized approach to remote device management and OTA updates, especially suited for managing distributed ECUs in connected vehicles. In this architecture:

- OTA Target ECUs refers to all in-vehicle components requiring updates, including safety-critical units such as ABS, airbags, or collision avoidance systems (Nilsson et al., 2008b).
- OTA Master ECU, typically the Telematics Control Unit (TCU) or Central Gateway Unit (CGU), acts as the coordinating entity responsible for managing the update process. It stores the OTA update package and communicates with the backend server to initiate updates across OTA targets (Halder et al., 2020).
- The update process adheres to a "Download → Install → Activate" sequence, where downloading is handled exclusively by the master ECU. The OTA target ECUs participate only during installation and activation, enhancing isolation and reducing security risks (Zandberg et al., 2019).

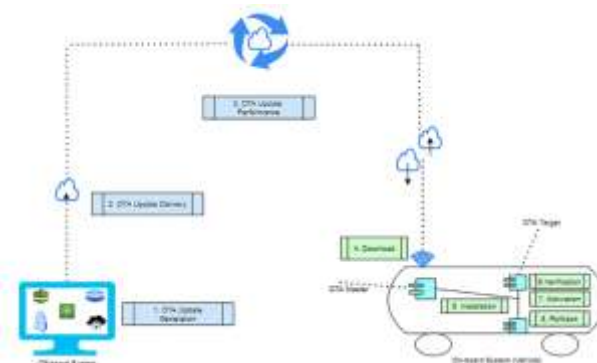


Figure 4. OTA stages and process (Iyieke et al., 2025).

4.2 Uptane-Based OTA Security Framework

Uptane is a robust, open-source framework specifically designed to provide secure OTA updates for automotive systems. It utilizes a multi-layered structure that addresses both data integrity and source authentication through cryptographically signed metadata (Fig. 5). The key components of Uptane are:

- **Image Repository:** Stores update files and their associated metadata. These files are digitally signed using offline keys, making tampering difficult (Arapinis et al., 2019).
- **Director Repository:** Determines which updates are applicable to specific vehicles by analyzing manifests received from the vehicle's ECUs. It prepares vehicle-specific update bundles and instructions (Asokan et al., 2018).
- **Time Server:** Provides secure, synchronized time data to defend against time-based attacks like freezing attacks. This is critical since many ECUs lack internal clocks.
- **Primary and Secondary ECUs:** Primary ECUs have higher processing and communication capabilities. They manage updating verification and distribute them to Secondary ECUs, which may only perform partial verification.
- **Communication Channels:** Uptane supports multiple layers of communication, including Ethernet, CAN Bus, and wireless technologies like 4G/5G or Wi-Fi to ensure robust update delivery.
- **Item Boundary and Operational Environment:** These are key concepts in maintaining security. The item boundary acts as a protective layer that governs access control, while the operational environment encompasses the broader software and hardware context of the vehicle.

Uptane employs a delegated role model that distributes trust across multiple cryptographic keys, thereby reducing systemic risk. Each role carries distinct signing responsibilities: the Root Role oversees top-level keys and delegates authority, the Timestamp Role authenticates metadata on update availability, the Snapshot Role records repository states, and the Targets Role verifies update file integrity through hashes and size metadata. This distribution of signing authority enhances the robustness of the OTA ecosystem, ensuring that even if one key is compromised, the layered structure prevents total system failure (Uptane, 2022).

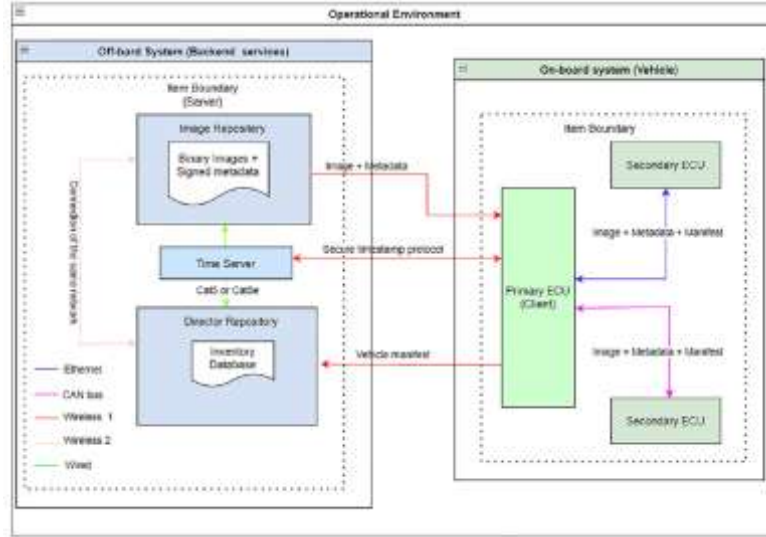


Figure 5. Uptane Framework on OTA update (Iyieke et al., 2025).

OTA technology has significantly transformed automotive software management by allowing manufacturers to remotely deliver updates, security patches, and new functionalities. Its impact can be examined across three primary dimensions. Security remains a critical concern, as OTA introduces potential attack vectors such as unauthorized access, firmware tampering, and data interception; thus, encryption, secure communication protocols, and robust authentication mechanisms are essential for safeguarding vehicle integrity. In terms of time-to-market, OTA accelerates feature deployment, reduces dependence on physical service visits, and shortens development cycles. Finally, through continuous feature evolution, manufacturers can refine existing capabilities or introduce new functions even after vehicle delivery, thereby enhancing user experience and extending product lifecycles.

UPDATE STRATEGIES IN OTA SYSTEMS

OTA technology has revolutionized the way automotive software is delivered and maintained. Modern vehicles incorporate various OTA update strategies that differ in complexity, efficiency, and applicability. A widely used method involves full image updates, which replace the entire software image on a given ECU. Although straightforward, this approach often requires significant download time and may disrupt system operation during installation. An alternative to full image updates is delta updates, which transfer only the changes between the current and updated versions. This method significantly reduces download size and time, thus minimizing vehicle downtime. Shao et al. (2023) emphasize that delta updates are particularly effective in connected vehicles, where minimizing network load is crucial for both user experience and system performance. More recently, container-based updates have emerged as a modular approach to OTA deployment. By isolating specific components or services within containers, manufacturers can selectively update features without affecting the entire system. Ko et al. (2024) highlight that containerized OTA solutions improve system resilience and simplify version management, as they enable targeted rollbacks in case of errors. Kim et al. (2018) discuss modular OTA frameworks, which allow updates to be applied to individual subsystems, reducing overall complexity and testing requirements. Such architecture enhances maintainability and flexibility, aligning with the industry's shift toward software-defined vehicles.

BEST PRACTICES AND DEPLOYMENT CONSIDERATIONS

For effective OTA deployment, manufacturers must adopt best practices that comprehensively address technical, operational, and security challenges. From a technical perspective, stable and sufficient network bandwidth is essential to ensure reliable downloads, while flash memory limitations must be managed to mitigate wear caused by repeated write cycles. Mechanisms for failed update handling, such as rollbacks or fallback images, are required to restore system functionality when updates are unsuccessful, complemented by post-update validation to confirm correct installation and preserve system integrity. Operationally, update scheduling during low-usage periods or through user consent mechanisms can reduce disruption, and robust error correction strategies are needed to manage packet loss. In addition, optimizing the OTA process to minimize power consumption is particularly critical for electric vehicles. From a security standpoint, safeguarding data confidentiality demands end-to-end encryption and secure key management, while data authenticity and integrity can be ensured through digital signatures and hash verification. Further, maintaining data freshness guarantees that only the latest software versions are deployed, and structured legacy data management procedures are vital for securely handling outdated files, thereby preserving both storage efficiency and overall system resilience.

CHALLENGES AND OPPORTUNITIES

Despite its advantages, OTA technology introduces several challenges that manufacturers must address to ensure safe and effective deployment. One of the primary concerns is cybersecurity. OTA systems are susceptible to various attack vectors, including unauthorized access, data interception, and firmware tampering. Wang et al. (2022) underline the importance of incorporating secure communication protocols, robust authentication mechanisms, and rigorous integrity checks into OTA processes. Another challenge is version management. As vehicles become increasingly reliant on software-driven functionalities, managing different software versions across numerous ECUs and vehicle models becomes a complex task. Shao et al. (2023) emphasizes that effective version control systems are crucial to ensure compatibility, avoid software conflicts, and enable safe rollbacks if necessary. From an operational perspective, OTA updates must be performed with minimal disruption to vehicle functionality. Ensuring that updates do not interfere with critical safety systems—such as braking or steering—requires careful scheduling, testing, and validation. Ko et al. (2024) note that real-time monitoring and fallback mechanisms can help mitigate risks associated with failed updates. On the opportunity side, OTA technology enables feature enhancement and personalization, allowing manufacturers to introduce new functions or improve existing ones based on customer feedback. Additionally, OTA can play a key role in regulatory compliance by ensuring that vehicles remain up to date with evolving safety and emissions standards. This capability strengthens customer trust and enhances the overall user experience.

FUTURE WORK

Although OTA systems have achieved notable advancements, particularly in updating delivery methods and security frameworks, several emerging areas demand further research and refinement. These domains offer potential to enhance the efficiency, scalability, and resilience of OTA deployment in increasingly software-defined and electrified vehicle platforms.

AI-Enhanced Update Planning: The growing volume and heterogeneity of vehicle software challenge the efficiency of conventional update management strategies. Future work should explore artificial intelligence (AI)-driven solutions that can intelligently plan, prioritize, and adapt OTA deployments based on vehicle usage patterns, driver behavior, and environmental context. For instance, reinforcement learning models could be trained to dynamically optimize update schedules to minimize user disruption and network congestion (Iyieke et al., 2025). Moreover, federated learning could enable collaborative model training across distributed fleets while maintaining data privacy and decentralization. These approaches would not only support predictive maintenance and update personalization but also contribute to a proactive safety culture in connected vehicles.

Blockchain-Based OTA Architecture: OTA introduces new attack surfaces, particularly during transmission and authentication phases. Integrating blockchain technology into OTA systems can address security and trust concerns through its decentralized, tamper-proof architecture. Research in this area has proposed the use of distributed ledgers for storing metadata and update logs, ensuring immutability and transparency in the update history (Asokan et al., 2018; Wang et al., 2022). In addition, smart contracts may be employed to automate verification and policy enforcement processes before updates are applied. However, conventional blockchain consensus mechanisms are computationally intensive for embedded systems.

Energy-Aware OTA for Electric Vehicles: EVs are particularly sensitive to auxiliary power consumption, including that of OTA processes. High-frequency or large-volume updates may result in non-negligible battery drain, impacting vehicle range and thermal stability. Despite this, limited research has been conducted on energy overhead associated with OTA tasks such as wireless communication, data decompression, and flash memory writes (Ko et al., 2024).

CONCLUSION

OTA technology has emerged as a cornerstone of modern automotive design, enabling manufacturers to deliver software updates, security patches, and new features seamlessly. This paper presents a structured review of OTA developments in the automotive domain, outlining key update strategies including full image, delta, and container-based updates. It also compares two prevailing OTA frameworks—OMA-DM and Uptane—highlighting their terminology, architecture, and security approaches. Key challenges such as cybersecurity vulnerabilities, energy efficiency (especially in electric vehicles), and software versioning complexities are discussed alongside best practices for robust deployment. Finally, the study identifies future research directions, including AI-assisted update scheduling and blockchain-secured OTA ecosystems.

References

- Agarwal, A., Mohapatra, P., & Pradhan, R. (2020). Secure OTA Software Update Framework for Automotive Systems. *IEEE Access*, 8, 65364–65375.
- Arapinis, M., Gkaniatsou, A., Karakostas, D., Kiayias, A., 2019. A formal treatment of hardware wallets. In: Financial Cryptography and Data Security: 23rd International Conference, FC 2019, Frigate Bay, St. Kitts and Nevis, February 18–22, 2019, Revised Selected Papers 23. Springer, pp. 426–445.
- Asokan, N., Nyman, T., Rattanaivanon, N., Sadeghi, A.-R., Tsudik, G., 2018. ASSURED: Architecture for secure software update of realistic embedded devices. *IEEE Trans. Comput.-Aided Des. Integr. Circuits Syst.* 37 (11), 2290–2300.
- Ebert, C., Favaro, J., 2017. Automotive software. *IEEE Softw.* 34 (03), 33–39 ETSI Sophia Antipolis, France, 2019. Cyber security for consumer Internet of Things.
- Halder, S., Ghosal, A., Conti, M., 2020. Secure over-the-air software updates in connected vehicles: A survey. *Comput. Netw.* 178, 107343.
- He, W., Yan, G., Xu, L.D., 2014. Developing vehicular data cloud services in the IoT environment. *IEEE Trans. Ind. Inform.* 10, 1587–1595.
- Iyieke, V., Jadidbonab, H., Rakib, A., Bryans, J., Dhaliwal, D., & Kosmas, O. (2025). An adaptable security-by-design approach for ensuring a secure Over the Air (OTA) update in modern vehicles. *Computers & Security*, 150, 104268.
- Kim, Y., Park, J., & Lee, C. (2018). Modular OTA Framework for Automotive Systems. In *Connected Vehicles and Data Analytics* (pp. 203–218). Springer. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-99130-6_12
- Ko, J., Lee, H., & Kim, M. (2024). OTA Update Strategies and Cybersecurity in Modern Vehicles. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*.
- Nilsson, D.K., Sun, L., Nakajima, T., 2008b. A framework for self-verification offirmwareupdates over the air in vehicle ecus. In: 2008 IEEE Globecom Workshops.GLOBECOM 2008, pp. 1–5.
- Shao, X., Li, Y., & Sun, X. (2023). A Framework for OTA Management in Connected Vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*.
- Sharma, V.S., Jalote, P., Trivedi, K.S., 2005. Evaluating performance attributes of layered software architecture. In: Component-Based Software Engineering: 8th International Symposium, CBSE 2005, St. Louis, MO, USA, May 14–15, 2005. Proceedings 8. Springer, pp. 66–81.
- UPTANE, 2022. Uptane standard for design and implementation. <https://uptane.github.io/papers/ieee-isto-6100.1.0.0.uptane-standard.html>.

Wang, Z., Chen, H., & Liu, X. (2022). OTA Cybersecurity for Autonomous and Connected Vehicles. *Computer Networks*, 210, 109-123.

Zandberg, K., Schleiser, K., Acosta, F., Tschofenig, H., Baccelli, E., 2019. Securefirmware updates for constrained iot devices using open standards: A reality check. *IEEE Access* 7, 71907–71920.

Effect of Double Hinge Line application on A-Pillar Trim Safety System Performance

Mehmet AYDIN

mehmet.aydin54704@tofas.com.tr ; TOFAŞ Türk Otomobil Fabrikası A.Ş. R&D Center, Bursa / Türkiye.

Özet

Otomotiv iç trim bileşenleri, çarpışma olayları sırasında yolcu güvenliğinde kritik bir rol oynar. Bu bileşenler arasında A sütunu (A-pillar) trim parçası, hava yastığı açılımını desteklemek ve baş yaralanması riskini azaltmak için yapısal bütünlük ile kontrollü deformasyon arasında bir denge kurmalıdır. Bu çalışma, A sütunu trim sisteminin güvenlik performansı üzerinde çift menteşe hattı (double hinge line) uygulamasının etkisini incelemektedir. Önerilen tasarım, deformasyonu yönlendirmek ve yan perde hava yastığının açılması sırasında trim parçasının açılma davranışını iyileştirmek amacıyla iki adet önceden tanımlanmış menteşe hattı içermektedir.

Sonlu elemanlar analizleri ile parça üzerinde bulunan yapıların gerilme değerleri incelenmiştir. Geleneksel tek menteşe konfigürasyonu, eğik tip menteşe hattı ve çift menteşe hattı tasarımını karşılaştırmak için parça seviyesinde testler gerçekleştirilmiştir. Başlıca değerlendirme kriterleri; trim açılma zamanlaması, hava yastığı açılımına müdahale, enerji sönümleme ve potansiyel baş darbe davranışı olmuştur. Sonuçlar, çift menteşe hattı konfigürasyonunun trim ayrılmasının öngörülebilirliğini artırdığını ve hava yastığı açılımı sırasında daha kararlı bir açılma yolu sağladığını göstermektedir. Bu iyileştirme, trim parçalarının parçalanma riskini azaltmakta ve açılan perde hava yastığıyla etkileşimi en aza indirmektedir.

Keywords: A sütunu trim, hava yastığı, çift menteşe hattı, güvenlik, enerji sönümleme, deformasyon

Abstract

Automotive interior trim components play a critical role in occupant protection during crash events. Among these components, the A-pillar trim must balance structural integrity with controlled deformation to support airbag deployment and reduce head injury risk. This study investigates the effect of a double hinge line application on the safety performance of the A-pillar trim system. The proposed design introduces two predefined hinge lines intended to guide deformation and improve the opening behavior of the trim during side curtain airbag deployment. The stress values of the structures on the part were examined with finite element simulations. Component-level tests were conducted to compare the conventional single-hinge configuration, inclined hinge line and the double hinge line design. Key evaluation criteria included trim opening timing, airbag deployment interference, energy absorption, and potential head impact behavior. Results indicate that the double hinge line configuration enhances the predictability of trim separation and promotes a more stable opening path during airbag deployment. This improvement reduces the risk of trim fragmentation and minimizes interference with deploying airbags. Furthermore, the modified design demonstrates

improved deformation control without significantly compromising structural stability under normal operating conditions. Overall, the findings suggest that implementing a double hinge line can contribute to improve A-pillar trim safety system performance during side curtain airbag deployment tests.

Keywords: A-pillar trim, airbag, double hinge line, safety, energy absorption, deformation

1. INTRODUCTION

Vehicle safety systems have evolved significantly over recent decades due to increasingly strict safety regulations and growing expectations regarding occupant protection (Du Bois et al., 2004). Modern passive safety systems combine structural crashworthiness, restraint technologies, and energy-absorbing interior components to reduce injury severity during collision events. Among these systems, automotive interior trim components have become increasingly important because of their interaction with occupants and supplemental restraint systems.

The A-pillar trim is one of the most critical interior trim components in terms of safety performance due to its proximity to the windshield structure and side curtain airbag deployment zone. During side-impact and rollover accidents, the side curtain airbag deploys rapidly from the roof rail area and must move through or around the A-pillar trim without obstruction. Improper trim behavior can interfere with airbag deployment, delay inflation timing, or generate fragmented components that may increase occupant injury risk (SAE International, 2020).

To address these limitations, this study proposes a double hinge line configuration for the A-pillar trim system. The design introduces two predefined deformation paths intended to improve opening predictability, reduce stress accumulation, and minimize deployment interference. The primary objective of this research is to evaluate the effectiveness of the double hinge line approach in enhancing trim deformation control and side curtain airbag deployment performance.

The study includes finite element simulations and component-level experimental validation to compare the proposed design with a conventional single-hinge configuration. Performance evaluation focuses on trim opening timing, deformation stability, energy absorption behavior, and occupant protection characteristics.

2. LITERATURE REVIEW

Interior trim safety has become an important area of research in automotive engineering due to increasing regulatory requirements and advancements in occupant protection technologies. Researchers have extensively investigated the interaction between interior trim systems and side curtain airbags, particularly regarding deployment reliability and head injury mitigation.

Material characterization has become increasingly important because airbag deployment occurs within milliseconds and subjects' interior components to high strain rates. Hersman et al. (1997) reviewed material options for automotive interior trims and noted that the introduction of invisible airbag deployment doors created new challenges for thermoplastic materials. Materials used in instrument panels and trim covers must provide sufficient structural integrity during normal operation while also allowing controlled tearing and deformation during airbag inflation.

Research on roof-mounted curtain airbags further demonstrated the critical role of interior trims during deployment events. Hendre and Purohit (2015) examined design considerations for curtain airbags integrated with roof rail and pillar trim systems. The authors identified trim protrusions, clip locations, overlap conditions, and mounting strategies as key parameters influencing deployment performance. Their findings indicated that improperly designed trim structures may obstruct the deployment path and create “hang-up” conditions, where the airbag becomes trapped or delayed during inflation.

Despite existing research concerning trim-airbag interaction, limited studies have specifically focused on the influence of double hinge line applications on A-pillar trim systems. Therefore, this study aims to contribute to the literature by investigating the safety and deformation performance of a dual-hinge trim design.

3. Methodology

3.1 Design Configurations

Three different A-pillar trim configurations were evaluated in this study: a conventional single-hinge design, inclined hinge line design, and double hinge line design. The conventional configuration consisted of one predefined hinge line integrated into the trim substrate together with a standard clip retention system and baseline production of geometry and material properties. Inclined hinge line version has a curvature transition line on part. In contrast, the double hinge line configuration incorporated two parallel hinge lines integrated into the trim structure, optimized deformation regions for controlled opening behavior, and modified local geometry intended to distribute stress more uniformly during deployment. All configurations utilize identical material compositions and mounting conditions to ensure a consistent and unbiased comparison.

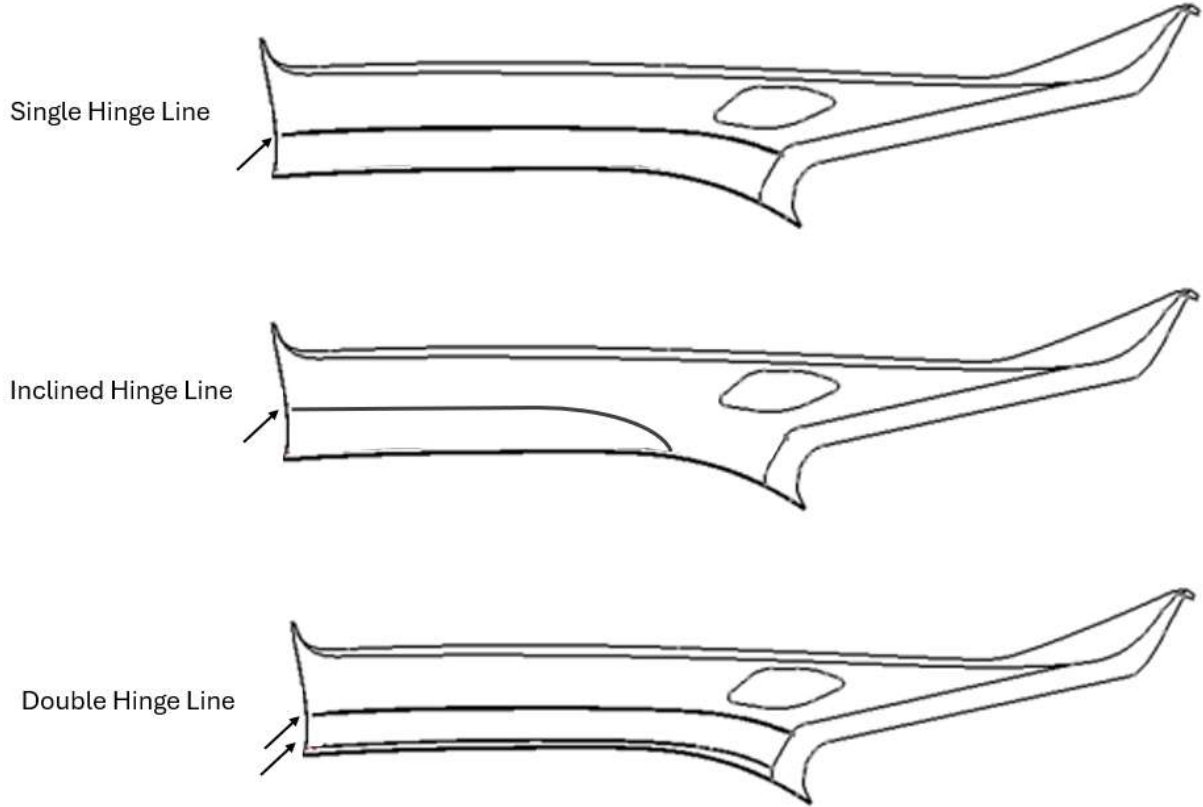


Figure 1. *Hinge Line Versions*

3.2 Finite Element Simulation

The simulation model included the A-pillar trim geometry, retention clips, cable clips, sheet metal body parts, side curtain airbag assembly, and contact interactions between all relevant components. The simulations focused on evaluating trim opening timing, maximum deformation displacement, stress distribution, airbag deployment interference, fragmentation tendency, and energy absorption characteristics. The stress values of the structures on the part were examined with finite element simulations.

3.3 Experimental Validation

Component-level deployment tests were performed to see differences between the variations. Prototype trims representing all hinge configurations were manufactured and assembled under representative vehicle mounting conditions. The experimental setup included production-level side curtain airbag modules, high-speed camera systems, and structural fixation elements representing vehicle interfaces. Deployment events were recorded and analyzed to compare opening trajectory, deployment consistency, failure modes, and structural integrity after deployment.

4. RESULTS AND DISCUSSION

4.1 Simulation Results

Simulation analyses revealed stress distribution on A-Pillar trim during curtain airbag deployment. A-Pillar trim b-surface structures have been analyzed and monitored in the deformation areas. Strain observed especially on fixation doghouse of tether clip. Related areas updated by adding ribs in order to increase the reinforcement. After geometical updates, simulations show better along with the modifications within the allowable plastic stain limit.

The curtain airbag system achieved more stable opening behavior, allowing the side curtain airbag to deploy with reduced interference. Furthermore, energy absorption characteristics improved because of the enabled more gradual deformation mechanism.

4.2 Experimental Findings

Physical deployment tests performed for all variations of hinge line design. High-speed camera recordings demonstrated that the double hinge line trim opened in a more stable and repeatable manner compared with the conventional single-hinge design.

The baseline configuration occasionally exhibited abrupt deformation and localized tearing near retention clip regions. Conversely, the double hinge line design reduced excessive localized strain and maintained overall structural integrity after deployment.

No significant durability or assembly-related issues were identified under normal operating conditions. The additional hinge feature did not negatively affect trim fitment, retention performance, or manufacturing feasibility.

4.3 Safety Implications

The improved deformation control observed in the double hinge line design has important implications for occupant safety. Stable trim opening behavior reduces the likelihood of delayed airbag deployment and minimizes the risk of deployment obstruction. Additionally, controlled deformation lowers the probability of detached trim fragments becoming secondary impact hazards during crash events.

The findings indicate that relatively simple geometric modifications can significantly improve interior trim safety performance without requiring major material or manufacturing changes. This approach therefore represents a cost-effective strategy for enhancing occupant protection in modern vehicle platforms.

5. CONCLUSION

The present study investigated the influence of a double hinge line design on the crash safety performance of automotive A-pillar trim systems with component-level experimental evaluations. The obtained results demonstrated that the proposed configuration significantly improves trim opening predictability and supports more reliable side curtain airbag deployment behavior during impact

conditions. Compared with conventional trim structures, the double hinge line approach provided more controlled deformation characteristics, reduced localized stress accumulation, minimized deployment interference, and lowered the risk of trim fragmentation.

In addition, the proposed design achieved these safety-related improvements without adversely affecting the structural integrity or functional durability requirements of the trim system under normal operating conditions. The enhanced deformation management capability of the double hinge configuration indicates its potential to improve occupant protection performance, particularly in side-impact and rollover crash scenarios where curtain airbag deployment efficiency is critical.

Overall, the findings show the potential that integrating double hinge line mechanisms into A-pillar trim systems represents a promising and practical solution for improving interior safety performance in modern vehicle architecture. Future research should focus on full-vehicle crash validation studies, optimization of hinge geometry and material parameters, and investigation of alternative lightweight material combinations to further enhance deployment reliability and crashworthiness performance.

References

- Hersman, M. J., Farrington, S., & Horsten, P. (1997). *Material options for automotive interior trim* (SAE Technical Paper 970446). SAE International. <https://doi.org/10.4271/970446>
- Hendre, K. M., & Purohit, Y. (2015). *Interior trims design considerations for roof mounted curtain airbag* (SAE Technical Paper 2015-26-0157). SAE International. <https://doi.org/10.4271/2015-26-0157>
- Du Bois, P., Chou, C. C., & Fileta, B. (2004). *Vehicle crashworthiness and occupant protection*. SAE International.
- SAE International. (2020). *Interior head impact protection standards and procedures*. SAE Technical Papers Collection.

Ön ve Arka Taban Halısı Poliüretan Köpük Tanım Değişikliği ile Rijitlik İyileştirme Çalışması

Hüseyin Oğuz CİVCİK

huseyin.oguzcivcik@tofas.com.tr; Tofaş Türk Otomobil Fabrikası A.Ş. Ar-Ge Merkezi, Bursa / Türkiye.

Özet

Bu çalışmada, ön ve arka taban halısı altında kullanılan poliüretan (PUR) köpük yapılarında gözlemlenen rijitlik problemleri detaylı olarak incelenmiştir. Mevcut tasarımda, özellikle batarya kapağı bölgesinde taban halısı ile batarya kapağı arasında istenmeyen boşluk (gap) oluştuğu tespit edilmiş olup, bu durum hem müşteri kalite algısını hem de yapısal performansı olumsuz etkilemektedir. Bu problemin çözümüne yönelik olarak üç farklı mühendislik yaklaşımı geliştirilmiş ve karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. İlk yaklaşımda, batarya kapağı bölgesinde PUR kalınlığı lokal olarak artırılarak bölgesel rijitlik iyileştirilmiştir. İkinci yaklaşımda ise aynı bölgeye ek URS sünger bileşenleri entegre edilerek yapısal destek sağlanmıştır. Ancak bu lokal çözümlerin sınırlı iyileşme sağladığı ve tasarım ile montaj süreçlerinde ek karmaşıklık oluşturduğu gözlemlenmiştir. Üçüncü yaklaşımda ise PUR malzeme tanımı tedarikçi ile birlikte optimize edilerek malzemenin genel mekanik davranışı iyileştirilmiştir. Bu sayede tüm parça genelinde daha homojen bir rijitlik dağılımı elde edilmiş ve lokal deformasyon eğilimi azaltılmıştır. Sonuç olarak, batarya kapağı bölgesinde gözlemlenen boşluk problemi tamamen ortadan kaldırılmıştır. Elde edilen bulgular, malzeme bazlı iyileştirme yaklaşımının lokal tasarım çözümlerine kıyasla daha etkili ve sürdürülebilir olduğunu göstermektedir. Ayrıca artırılan rijitlik ile NVH performansı, boyutsal stabilite ve müşteri kalite algısı da iyileştirilmiştir. Bu çalışma, otomotiv iç trim uygulamalarında malzeme optimizasyonunun kritik rolünü ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Taban halısı, poliüretan, PUR köpük, rijitlik, otomotiv, üretilebilirlik, malzeme optimizasyonu, yapısal dayanım, NVH

Abstract

In this study, rigidity issues observed in polyurethane (PUR) foam structures used under front and rear floor carpets are investigated in detail. In the current design, an undesirable gap between the floor carpet and the battery cover, particularly in the battery cover region, was identified, negatively affecting both perceived quality and structural performance. To address this issue, three different engineering approaches were developed and comparatively evaluated. The first approach involved locally increasing the PUR thickness in the battery cover region to enhance regional stiffness. The second approach introduced additional URS foam components to provide structural support in the same area. However, these local solutions resulted in limited improvements and introduced additional complexity in design and assembly processes. In the third approach, the PUR material definition was optimized together with the supplier in order to improve the overall mechanical behavior of the material. As a result, a more homogeneous stiffness distribution was achieved throughout the part and

local deformation tendency was reduced significantly. Consequently, the gap issue observed in the battery cover region was completely eliminated. The findings demonstrate that material-based optimization is more effective and sustainable than localized design solutions. Furthermore, increased rigidity improved NVH performance, dimensional stability and perceived quality. This study highlights the critical role of material optimization in automotive interior trim applications.

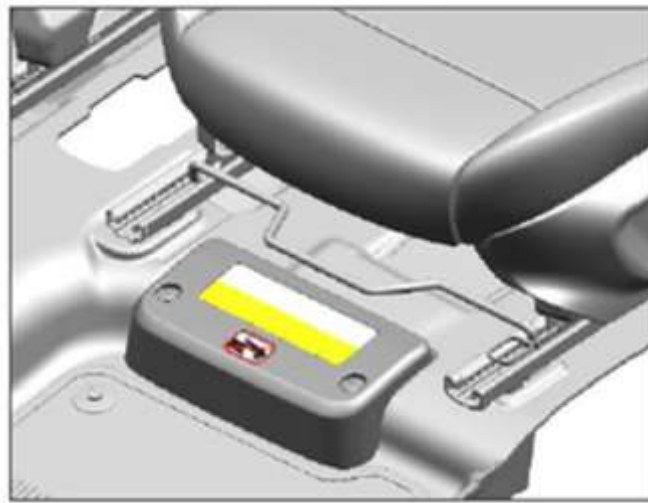
Keywords: Floor carpet, polyurethane, PUR foam, rigidity, automotive, manufacturability, material optimization, structural stiffness, NVH

GİRİŞ

Otomotiv endüstrisinde iç trim bileşenleri yalnızca estetik açıdan değil, aynı zamanda araç içi konfor, NVH performansı, güvenlik ve müşteri kalite algısı açısından da kritik öneme sahiptir. Özellikle taban halısı sistemleri; ses izolasyonu, titreşim sönümleme, termal yalıtım ve ergonomik kullanım gibi birçok temel fonksiyonu aynı anda yerine getirmektedir.

Araç taban halıları genel olarak tekstil esaslı üst yüzey, ses yutucu katmanlar ve destekleyici köpük yapılarından oluşan çok katmanlı sistemlerdir. Bu sistemlerde kullanılan poliüretan (PUR) köpük yapılar, halının araç zemini üzerinde stabil şekilde konumlanmasını sağlamakta ve lokal yükler altında deformasyon davranışını doğrudan etkilemektedir.

Elektrikli ve hibrit araç mimarilerinin yaygınlaşmasıyla birlikte araç içi zemin geometrileri daha kompleks hale gelmiştir. Özellikle batarya kapağı bölgelerinde (Şekil 1) oluşan lokal yükseklik farklılıkları, taban halısı altında kullanılan destekleyici köpük sistemlerinin performansını daha kritik hale getirmiştir.



Şekil 1. Halı Batarya Kapağı Bölgesi

YÖNTEM

Mevcut taban halısı sisteminde, özellikle batarya kapağı bölgesinde lokal rijitlik yetersizliği gözlemlenmiştir (Şekil 2). Bu durum, araç montajı sonrasında taban halısının belirli bölgelerinde çökme eğilimine neden olmuş ve halı yüzeyi ile alt yapı arasında istenmeyen boşluk oluşmasına sebep olmuştur.

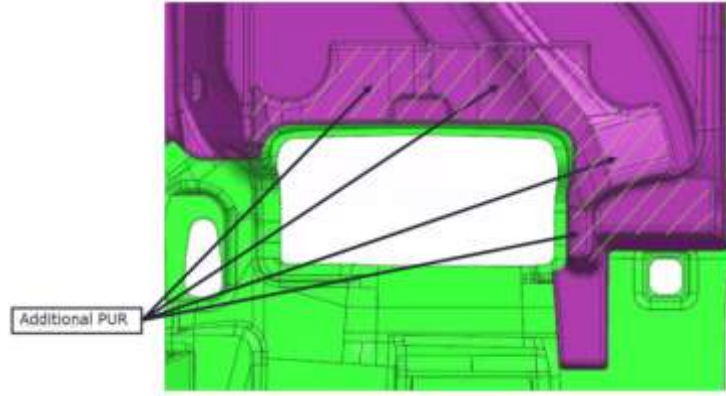


Şekil 2. Problemi gösterir görseller

Söz konusu boşluk problemi özellikle müşteri tarafından görülebilen bölgelerde kalite algısını olumsuz etkileyen bir durum oluşturmuştur. Ayrıca düşük rijitlik nedeniyle parça üzerinde lokal deformasyon davranışının artması, uzun dönem kullanım performansı açısından da risk oluşturmaktadır.

Problemin çözümüne yönelik olarak üç farklı mühendislik yaklaşımı geliştirilmiş ve fiziksel değerlendirmeler ile karşılaştırmalı analizler gerçekleştirilmiştir.

İlk yaklaşımda, batarya kapağı bölgesinde lokal PUR kalınlığı artırılarak (Şekil 3) ilgili bölgede daha yüksek yapısal destek elde edilmesi hedeflenmiştir. Ancak bu çözüm tüm parça genelinde homojen davranış sağlayamamıştır.



Şekil 3. Birinci Çözüm

İkinci çözüm yaklaşımında ise batarya kapağı bölgesine ek URS sünger bileşenleri entegre edilmiştir (Şekil 4). Bu yaklaşım ile ilgili bölgede destekleme etkisi artırılmıştır ancak ek komponent kullanımı nedeniyle montaj karmaşıklığı ve tolerans yönetimi problemleri ortaya çıkmıştır.



Şekil 4. İkinci Çözüm

Üçüncü yaklaşımda ise PUR köpük malzeme tanımı optimize edilmiştir. Bu geliştirme sayesinde tüm parça genelinde daha homojen rijitlik dağılımı elde edilmiş ve lokal deformasyon eğilimi azaltılmıştır. Böylece batarya kapağı bölgesindeki boşluk problemi tamamen giderilmiştir (Şekil 5).



Şekil 5. Boşluk Problemi Çözüm 3 Sonucu

BULGULAR

Yapılan fiziksel değerlendirmelerde mevcut PUR yapısının özellikle batarya kapağı bölgesinde yeterli yüzey stabilitesi sağlayamadığı gözlemlenmiştir. Araç montajı sonrasında ilgili bölgede lokal çökme davranışı meydana geldiği ve taban halısı ile batarya kapağı arasında görünür boşluk oluştuğu tespit edilmiştir.

Lokal PUR kalınlık artırımı uygulanan ilk çözümde bölgesel rijitlik davranışında iyileşme gözlemlenmiş, ancak tüm parça genelinde homojen stabilite elde edilememiştir. Ek URS sünger kullanılan ikinci çözümde ise boşluk davranışının azaldığı görülmüş, fakat montaj karmaşıklığı ve tolerans yönetimi açısından ek problemler ortaya çıkmıştır.

PUR malzeme optimizasyonu uygulanan nihai çözümde ise tüm parça genelinde daha dengeli rijitlik davranışı elde edilmiştir. Yapılan değerlendirmelerde batarya kapağı bölgesindeki boşluk probleminin ortadan kalktığı ve yüzey stabilitesinin iyileştiği gözlemlenmiştir. Ayrıca lokal deformasyon eğiliminin azaldığı ve parçanın montaj sonrası davranışının daha kararlı hale geldiği değerlendirilmiştir.

SONUÇ VE TARTIŞMA

Yapılan değerlendirmelerde PUR malzeme optimizasyonunun en etkili çözüm olduğu belirlenmiştir. Lokal çözümler belirli iyileştirmeler sağlamış olsa da global rijitlik davranışı açısından yeterli performans gösterememiştir.

Optimize edilen PUR yapısı sayesinde:

- Lokal çökme davranışı azaltılmış,
- Gap problemi elimine edilmiş,
- Yüzey stabilitesi iyileştirilmiş,
- NVH performansı artırılmış,

- Müşteri kalite algısı geliştirilmiştir.

Bu çalışma, otomotiv iç trim sistemlerinde yalnızca geometrik çözümlerin değil, malzeme davranışına yönelik optimizasyon çalışmalarının da kritik öneme sahip olduğunu göstermektedir.

KAYNAKÇA

Gama, N. V., Ferreira, A., & Barros-Timmons, A. (2018). Polyurethane foams: Past, present, and future. *Materials*, 11(10), 1841. <https://doi.org/10.3390/ma11101841>

Mallick, P. K. (2010). *Materials, design and manufacturing for lightweight vehicles*. Elsevier.

Park, C. K., Hollowell, W. T., & Hill, S. I. (2012). Investigation of opportunities for lightweight vehicles using advanced plastics and composites (DOT HS 811 692). National Highway Traffic Safety Administration.

Patching, M., Taylor, J., & Khan, H. (2007). Carpets and floor surface technologies: An overview considering global vehicle design and performance.

Otomotiv Sektöründe Ölçüm Yöntemlerinin Gap & Flush Üzerine Etkisi

Furkan ALEMDAR¹, Ömer Faruk YÜCEL²

¹furkan.alemdar@tofas.com.tr; Tofaş Türk Otomobil Fabrikası A.Ş., Ar-Ge Merkezi, Bursa / Türkiye.

²omer.farukyucel@tofas.com.tr; Tofaş Türk Otomobil Fabrikası A.Ş., Ar-Ge Merkezi, Bursa/ Türkiye.

Özet

Otomotiv endüstrisinde kalite algısını belirleyen en kritik parametrelerden biri gap&flush uygunluğudur. Araç üzerindeki kapı, kaput, bagaj kapağı, tampon ve diğer dış trim parçaları arasındaki boşluklar (gap) ile yüzey hizaları (flush), hem estetik hem de fonksiyonel kaliteyi doğrudan etkiler. Özellikle premium segmentte panel aralıklarının simetrisi ve yüzey sürekliliği müşteri algısında önemli rol oynar. Bunun yanında gap & flush yönetimi; aerodinamik performans, NVH (Noise, Vibration, Harshness), su sızdırmazlığı, montaj doğruluğu ve üretim tekrarlanabilirliği açısından da kritik öneme sahiptir. Modern otomotiv üretiminde gap & flush kontrolü yalnızca son montaj ölçümlerine bağlı değildir; tasarım, kaynak geometrisi, fiksür doğruluğu, tolerans yönetimi ve ölçüm teknolojileri süreci doğrudan etkiler. Bu çalışmada otomotiv sektöründe kullanılan başlıca ölçüm yöntemleri ile bu yöntemlerin gap & flush performansı ve üretim kalitesi üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Boşluk & Profil, Algılanan Kalite, Ölçüm Yöntemleri, Kalite Kontrol, Geometri Kalite

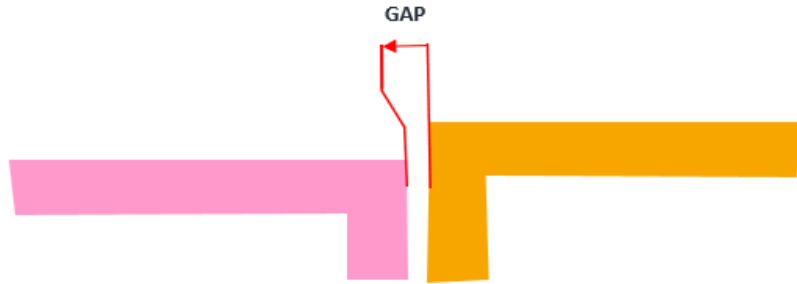
Abstract

One of the most critical parameters determining perceived quality in the automotive industry is body assembly quality. The gaps (gap) and surface alignments (flush) between vehicle components such as doors, hood, trunk lid, bumpers, and other exterior trim parts directly affect both aesthetic and functional quality. Especially in the premium segment, the symmetry of panel gaps and surface continuity play a significant role in customer perception. In addition, gap & flush management is also critical in terms of aerodynamic performance, NVH (Noise, Vibration, Harshness), water tightness, assembly accuracy, and production repeatability. In modern automotive manufacturing, gap & flush control does not rely solely on final assembly inspections; design, welding geometry, fixture accuracy, tolerance management, and measurement technologies directly influence the process. This study investigates the primary measurement methods used in the automotive industry and evaluates their effects on gap & flush performance and overall production quality.

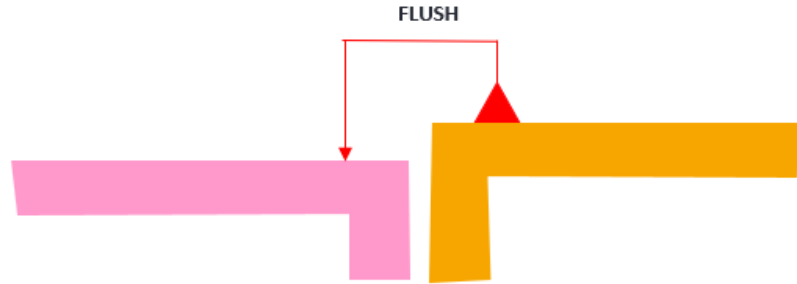
Keywords: Gap & Flush, Perceived Quality, Measurement Methods, Quality Inspection, Geometric Quality

GİRİŞ

Otomotiv endüstrisinde müşteri memnuniyetini ve marka imajını doğrudan etkileyen en önemli rekabet unsurlarından biri aracın algılanan kalitesidir. Algılanan kaliteyi belirleyen en önemli etken ise aracın gap & flush (boşluk & profil) performansıdır. Gap iki komşu parça arasındaki boşluk mesafesini belirtir (şekil 1), flush ise komşu yüzeyler arasındaki seviye farkını belirtir (şekil 2). Algılanan kalitenin performansı hem nihai müşteri memnuniyetini artırır hem de aracın fonksiyonel performansını doğrudan etkiler. Kapı, kaput, bagaj kapağı, tampon, çamurluk ve dış trim parçaları gibi çevre parçalar arasındaki boyutsal ilişki; özellikle premium segment araçlarda simetri, yüzey sürekliliği ve düzgün panel aralıklarının üretim kalitesinin göstergesi olarak değerlendirilmesi nedeniyle müşteri algısını doğrudan etkilemektedir [D’Emilia et al., 2020].



Şekil 1. Gap Tanımı

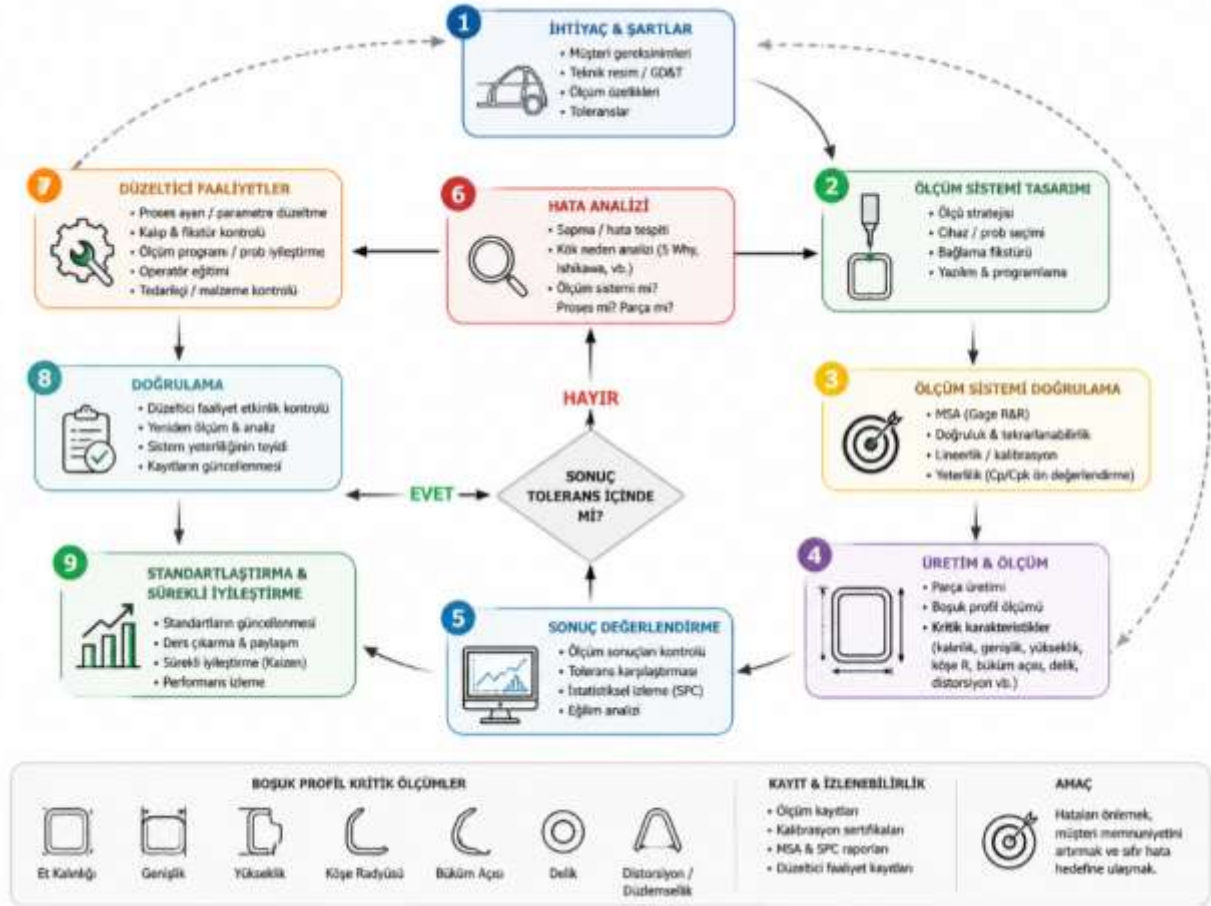


Şekil 2. Flush Tanımı

Estetik etkilerin yanı sıra gap & flush yönetimi; aerodinamik performans, su sızdırmazlığı, NVH (Noise, Vibration, Harshness) karakteristiği, montaj hassasiyeti ve üretim tekrarlanabilirliği açısından da önemli mühendislik çıktıları oluşturmaktadır. Problemlere gap & flush koşulları araç üzerinde ses problemleri, su alma problemleri, montaj uyumsuzlukları ve kalite algısında düşüş gibi çeşitli problemlere neden olabilmektedir. Bu nedenle otomotiv üreticileri ürün geliştirme ve seri üretim süreçlerinde oldukça sıkı boyutsal kalite kriterleri uygulamaktadır.

Modern otomotiv üretim sistemlerinde hedeflenen gap & flush değerlerine ulaşılması yalnızca son montaj operasyonlarında yapılan ayarlamalara bağlı değildir. Parça tasarımı, sac şekillendirme doğruluğu, kaynak geometrisi, fikstür konumlandırması, robot kalibrasyonu, tolerans zinciri yönetimi ve boyutsal varyasyon kontrolü gibi birçok parametre nihai montaj kalitesini doğrudan etkilemektedir.

Bu nedenle güvenilir boyutsal doğrulama süreçleri ve uygun ölçüm metodolojilerinin seçimi, proses performansının doğru değerlendirilmesi ve kök neden analizlerinin sağlıklı şekilde gerçekleştirilebilmesi açısından büyük önem taşımaktadır [Pang et al. (2024)].



Şekil 3. Otomotivde Boşluk profil Ölçümleri Kalite Hata Döngüsü Şeması

Şekil 3'te görüldüğü gibi farklı ölçüm stratejileri aynı parçaya ait geometrik verilerin farklı şekilde yorumlanmasına neden olabilmektedir. Geleneksel datum bazlı hizalama yöntemleri, best-fit hizalama yaklaşımları ve fixture-constrained ölçüm metodolojileri farklı sınır koşullarını temsil etmekte ve araç üzerindeki gerçek montaj davranışı ile farklı seviyelerde korelasyon göstermektedir. Bu durum, uygun olmayan ölçüm stratejilerinin yanıltıcı boyutsal değerlendirmelere, yanlış mühendislik kararlarına ve etkisiz düzeltici faaliyetlere neden olabilmesine yol açmaktadır.

Bu çalışmada otomotiv sektöründe kullanılan başlıca ölçüm metodolojileri incelenmiş, bu yöntemlerin gap & flush performansı üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Farklı ölçüm yaklaşımlarının avantajları, sınırlamaları ve üretim kalitesi üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak analiz edilerek, ölçüm stratejileri ile montaj seviyesi boyutsal davranış arasındaki ilişkinin daha iyi anlaşılması amaçlanmıştır.

YÖNTEM

Otomotivde kullanılan ölçüm yöntemlerini manuel ölçüm yöntemleri, temaslı dijital ölçüm sistemleri, optik ölçüm sistemleri ve kamera tabanlı vision sistemleri olarak 4 ana grupta sınıflandırılabilir. Tüm yöntemlerin birbirlerine göre avantajları ve dezavantajları bulunmakla birlikte otomobil üreticileri tarafından sıklıkla kullanılmaktadır.

1. Manuel Ölçüm Yöntemleri

Otomotivde kullanılan ölçüm yöntemlerini manuel ölçüm yöntemleri, temaslı dijital ölçüm sistemleri, optik ölçüm sistemleri ve kamera tabanlı vision sistemleri olarak 4 ana grupta sınıflandırılabilir. Manuel ölçüm yöntemleri genel olarak en hızlı ve kolay uygulanabilen yöntemlerdir. Genel olarak basit uygulanabilir ve düşük maliyetlidirler fakat operatör bağımlılığı, tekrarlanabilirlik düşüklüğü ve hassasiyet sınırlaması nedeniyle yanlış kalite kararları alınabilir ve ölçüm sistemi kaynaklı hatalar yükselebilir.

1.1 Mastar (Feeler Gauge) Ölçümü

En eski ve en temel yöntemlerden biridir. Hem proje aşamasında hem de seri üretimde ölçüm kolaylığı sayesinde hızlı ve etkili bir yöntem olarak hala kullanılmaktadır. Çalışma prensibi temel olarak sentil aletinin (şekil 4) belirli kalınlıktaki metal yapraklarının boşluğa yerleştirilmesi ve boşluğa uyan kalınlığın ölçü değeri olarak kabul edilmesi şeklindedir. Düşük maliyet, hızlı kullanım, basit uygulama gibi avantajlı yönlerinin yanında operatör bağımlılığı, tekrarlanabilirlik düşüklüğü, hassasiyet sınırlaması gibi dezavantajlara sahiptir.



Şekil 4. Sentil Çakısı

Gap & Flush Üzerindeki Etkileri:

Bu yöntemde operatör baskısı sonucu farklı ölçümler oluşabilir. Özellikle premium araçlarda gereken ± 0.2 mm hassasiyet sağlanamaz. İnsan faktörü nedeniyle proses varyasyonu artar. Sonuç olarak ölçüm sistemi kaynaklı hata (MSA hatası) yükselir. Yanlış kalite kararları alınabilir.

1.2 Mekanik Gap & Flush Kumpasları

Özel tasarlanmış otomotiv kumpasları gap genişliğini ve flush farkını aynı anda ölçebilir. Spesifik parçalar için tercih edilebilir bütün parçaların ortak kullanımı için uygun olmayabilir. Daha yüksek doğrulukla ölçüm yapılabilir.

Temaslı ölçüm yöntemleri manuel yöntemlere göre daha kararlı sonuç verir. Ancak karmaşık yüzey geometrilerinde hata oluşabildiği gibi yüzey hasarı riski de oluşabilir. Özellikle esnek tampon yüzeylerinde boya sonrası elastik deformasyonlarda ölçüm sapmaları görülebilir.

2. Temaslı Dijital Ölçüm Sistemleri

Temaslı dijital ölçüm sistemleri manuel ölçüm yöntemlerine kıyasla daha güvenilir kabul edilir. Hata tespitinde en nihai sonuç dijital ölçüm sistemleri çıktısına göre belirlenir. Genel olarak manuel ölçüm sistemlerine kıyasla daha yüksek iş gücü ve maliyet içerir.

2.1 CMM (Coordinate Measuring Machine)

Temaslı dijital ölçüm sistemlerinin başında otomotiv sektöründe en çok kullanılan CMM ölçüm cihazı gelir. CMM ölçüm cihazı en güvenilir ve en doğru ölçümü yapan yöntem olduğu kabul edilir. Fakat ölçüm süresinin uzunluğu ve yetkin personel ihtiyacı sebebiyle diğer ölçüm yöntemlerine göre olan zorlukları vardır. Çalışma prensibi Prob aracılığıyla yüzeye temas edilir. XYZ koordinatları alınır. CAD datası ile karşılaştırılır. Böylelikle çok yüksek hassasiyetli ölçümler yapılabilir. Mikron seviyesinde doğruluk elde edilip detaylı geometrik analize olanak tanır. Fakat ölçüm süresinin uzun olması yüksek maliyeti operatör uzmanlığı ihtiyacı gibi sebeplerden her durumda bu yönteme başvurulmayabilir. [Pogson 2020]

Gap & Flush Üzerindeki Etkileri:

Proje geliştirme safhalarında G&F ölçümlerinin çoğu CMM cihazıyla yapılır, Şekil 5. Referans ölçüm standardı olarak kullanılır. Master kalite doğrulamasında çok etkilidir. Ancak ölçüm süresi üretim temposuna yetişmeyebilir. Seri faza geçildiğinde ise belirli frekanslarda bu ölçüm tekrarlanırsa da çoğunlukla yerini kontrol fikstürü ölçümlerine bırakır.



Şekil 5. CMM Ölçüm Cihazı

3. Optik Ölçüm Sistemleri

Modern otomotiv üretiminde en kritik dönüşüm optik ölçüm teknolojileriyle gerçekleşmiştir. Optik ölçüm yöntemleri günümüzde en kapsamlı ve insan hatasını en aza sindirecek düzeyde otonom kontroller gerçekleştirebilen bir yapıya evrilmiştir. Yatırım maliyetleri fazla olsa da geleceğin kalite kontrol dönüşümü optik aletlerden geçmektedir.

G&F ölçümlerini özellikle seri fazda kontrol frekansının artırılması ve daha hızlı ve doğru ölçümler yapılabilmesi için kritik bir önem taşır. Ölçüm frekansını artırarak proses dışı parça tespiti kolaylaşır kalite hatalarının önüne geçilir.

3.1 Lazer Tabanlı Ölçüm Sistemleri

Lazer triangulation prensibi kullanılır.- Çalışma mantığı lazer çizgisi yüzeye gönderilir kameralar deformasyonu algılar. Yazılım yüzey profilini hesaplar ve oluşan sapmayı analiz eder. Bu sayede temassız ölçüm, yüksek hız, robot entegrasyonu gibi modern hat teknolojilerine entegrasyonu sağlanabilir. Yine de yüzey parlaklığından etkilenme reflektif boya problemleri kalibrasyon hassasiyeti gibi önemli noktalara dikkat edilmelidir aksi halde istenmeyen sonuçlarla karşılaşılabilir. [Tran ve Ha 2018]



Şekil 6. Lazer Ölçüm Cihazı

Gap & Flush Üzerindeki Etkileri:

Lazer sistemlerinin G&F üzerine etkilerine değinecek olursak daha hızlı veri alıp aksiyon alınabilir. Kalite süreçlerinde oldukça önemli olan SPC (Statistical Process Control) değerlendirmesine olanak verir. Böylece, proste oluşan sapmalar istatistiksel proses kontrol sayesinde erken saptanır rework edilen parça sayısı ve haliyle maliyetle düşer seri üretimde alınan hata azalır.

Ancak her ne kadar detaylı analiz ve hızlı aksiyonlara imkân sağlasa da yanlış kalibre edilmiş ölçüm aletleri kullanılması durumunda üretim kapasitesini bozan hattı durdurmaya kadar gidecek sistematik hatalara yol açabilir. Belirli aralıklardaki yapılan bütün üretim yanlış olabilir böylelikle çok büyük ıskarta maliyeti ve geri işçilik maliyetleriyle karşılaşılabilir. G&F ölçümlerinde daha az kritikliğe sahip hızlı ölçüm yapılacak bölgelerde tercih edilebilir.

3.2 3D Tarama Sistemleri

3D Tarama sistemlerinin çoğu beyaz ışık veya yapılandırılmış ışık teknolojisi kullanılır. Bu sistemlere verilecek en güzel örnekler GOM GMBH firmasına ait ATOS ölçüm cihazlarıdır. Özellikle otomotiv sektöründe en çok kullanılan modeller Blue Light Scanner ve Structured Light Systems modelleridir.

Bu sistemler proje veya üretim süresince belirli hatalar alınmadan pek tercih edilmez. Sebeplerine gelecek olursak uzun süren tarama ve manuel olarak taranması işçilik maliyetini artırır. Fakat tersine mühendislik çalışmaları için birebir çözüm yöntemi olduğu için hatanın kök neden analizi konusunda etkilidir.

Bütün yüzey taraması renkli sapma hataları analizi CAD model taranmış veri karşılaştırması yapması gibi durumlardan dolayı tercih edilebilir ama yatırım maliyetinin ve ortam hassasiyetinin gözden kaçmaması gerekir.

Gap & Flush Üzerine Etkileri:

3D sistemlerin G&F üstüne etkisi diğer yöntemlerden farklı olarak lokal değil, bütünsel analiz sağlar. Panel deformasyonlarını detaylı gösterir. Sac geri yaylanması (springback) etkilerini ortaya çıkarır. Özellikle yeni model devreye alma süreçlerinde, Kalıp validasyonunda BIW (Body in White) analizlerinde çok kritik rol oynar.

Kalibrasyon hataları lazerli ölçüme paralel şekilde sonuçlar verir. Kalibrasyon hatası durumunda üretim aksamaları ıskarta maliyetleri ve geri işçilik maliyetlerinde çok yüksek artışlar görülebilir. Her ne kadar prosese yardımcı metotlar olsa da kalibrasyonu yapılmayan aletler felaket sonuçlara yol açabilir.

4. Kamera Tabanlı Görüntü Sistemleri

Son yıllarda oldukça gelişen ve bütün sektörlerde kullanımı artan görüntü işleme teknolojileri bu alanda yenilikçi yaklaşımları beraberinde getiriyor. AI kullanımını beraberinde getirmesi insan etkileşimini dolayısıyla insan hatasını minimuma indirmesi otonom analizlere olanak tanınması bu yöntemin akla ilk gelen avantajlarındandır.

Çalışma Prensipleri ilk olarak kameralar görüntü alır, AI veya görüntü işleme algoritmalarına aktarır panel kenarlarını boşlukları yüzey geçişlerini detaylı şekilde analiz eder.

Bu sayede çok hızlı ölçüm alınabilir %100 kontrol imkanına olanak verir robot entegrasyonu sağlanabilir İnsan bağımlılığını en aza indirir. Fakat ışık koşullarına hassasiyeti sebebiyle farklı önlemler alınması gerekebilir yüzey yansımaları gibi durumlara dikkat edilmelidir.

AI Destekli Görüntü Sistemlerinin Gap & Flush Üzerindeki Etkisi

Günümüzde Tesla, Toyota ve Volkswagen gibi üreticiler AI tabanlı kalite kontrol sistemlerine yatırım yapmaktadır. Bu da gelecek dönemde bu ve benzeri sistemlerin sektörde kritik bir öneme sahip olacağını bize anlatabilir.

Bu sistemlerin etkilerine değinecek olursak %100 üretim kontrolü sağlaması operatör bağımlılığının azalması sağlaması gerçek zamanlı hata analizi yapabilmesi büyük veri analitiğine olanak sağlaması gibi yaralarından dolayı çok daha analitik ve doğru yaklaşımlar sunabildiği için tercih edilebilir. Ancak yanlış eğitim verisi, algoritmik sapmalar, kamera kör noktaları yanlış kalite kararlarına yol açabilir.

BULGULAR

Ölçüm Hatalarının Gap & Flush Üzerindeki Etkileri

Ölçüm hataları G&F üzerine 2 farklı etkide bulunabilir, bunlardan biri estetik etki diğeri ise çok daha kritik bir öneme sahip olan fonksiyonel etki.

Estetik etkilere verilebilecek en önemli örnekler asimetrik boşluklar homojen olmayan yüzey geçişleri kesintili panel hizaları bu hatalar görsel kalite algısını ciddi derecede bozuk marka algısına ciddi zarar verir. Özellikle BMW, Mercedes-Benz ve Audi gibi premium üreticiler, gap & flush toleranslarını marka kimliğinin parçası olarak görür.

Fonksiyonel etkilerde ise örnekler daha kritik olarak olan kapı kapanma kalitesini artırır, su ve toz sızdırmazlığını iyileştirir rüzgâr sesini azaltır boya sürtünmesini önler ve korozyon riskini azaltır.

Tablo 1. Ölçüm Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Ölçüm Yöntemi	Hassasiyet	Hız	Maliyet	Uygulanabilirlik	Operatör Etkisi
Mastar	Düşük	Yüksek	Düşük	Evet	Çok yüksek
Mekanik Kumpas	Orta	Orta	Düşük	Kısmen	Yüksek
CMM	Çok yüksek	Düşük	Çok yüksek	Evet	Düşük
Lazer Sistemleri	Yüksek	Orta	Yüksek	Evet	Düşük
3D Tarama	Yüksek	Orta	Çok yüksek	Kısmen	Düşük
Görüntü Sistemleri	Yüksek	Çok yüksek	Yüksek	Evet	Çok düşük

Tablodan da anlaşılacağı gibi ölçüm yöntemlerinin birbirlerine göre birçok avantajı ve dezavantajı bulunmaktadır. Özellikle gap&flush ölçümlerinde proje geliştirme aşamasında oluşabilecek hataların

seri üretime yansması daha kritik olacaktır bunun önüne geçmek için en güvenilir yöntem girmek en doğru çözüm olacaktır. Seri üretim aşamasında da tablodan da anlaşılacağı gibi yüksek hacimli üretim durumlarında yüksek hızlı master ölçümleri en uygulanabilir yöntem olarak öne çıkmaktadır. İlave olarak gap&flush hatalarında parça geometrisine bağlı olarak belirli durumlarda diğer yöntemler tercih edilebilir.

SONUÇ VE TARTIŞMA

Otomotiv sektöründe gap & flush kalitesi yalnızca estetik bir unsur değil; üretim doğruluğu, montaj stabilitesi, aerodinamik performans, NVH (Noise–Vibration–Harshness) davranışı, su ve toz sızdırmazlığı ile doğrudan ilişkili kritik bir kalite parametresidir. Araç üzerindeki panel geçişlerinin homojenliği, müşterinin araca yönelik ilk kalite algısını belirleyen en önemli kriterlerden biri haline gelmiştir. Bu nedenle boşluk ve profil ölçümleri, modern otomotiv üretiminde yalnızca son kontrol aşamasında değil, tüm üretim sürecinin ayrılmaz bir parçası olarak değerlendirilmektedir.

Bu çalışmada otomotiv sektöründe kullanılan boşluk (gap) ve profil (flush) ölçüm yöntemleri ile bu yöntemlerin kalite performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Yapılan değerlendirmeler sonucunda, her ölçüm yönteminin doğruluk, hız, maliyet, operatör bağımlılığı ve proses entegrasyonu açısından farklı avantaj ve dezavantajlara sahip olduğu açık şekilde görülmüştür. Ölçüm sisteminin seçimi; üretim hacmi, kalite beklentisi, tolerans seviyesi ve yatırım maliyeti gibi kriterlere bağlı olarak değişmektedir.

Çalışmadan elde edilen bulgular doğrultusunda, tek bir ölçüm yönteminin tüm üretim ihtiyaçlarını karşılamasının mümkün olmadığı sonucuna ulaşılmıştır. En etkin kalite yönetimi yaklaşımı; manuel, referans ve otomatik ölçüm sistemlerinin birbirini tamamlayacak şekilde hibrit olarak kullanılmasıdır. Özellikle seri üretimde inline optik sistemler ile laboratuvar doğrulama sistemlerinin birlikte kullanılması hem yüksek doğruluk hem de yüksek proses verimliliği sağlamaktadır.

Sonuç olarak otomotiv sektöründe boşluk ve profil yönetimi, yalnızca ölçüm teknolojisi seçimi değil; proses kabiliyeti, üretim mühendisliği, veri analitiği ve müşteri beklentisinin birlikte değerlendirilmesini gerektiren çok disiplinli bir yapıdır. Gelecekte yapay zekâ destekli, gerçek zamanlı ve otonom kalite kontrol sistemlerinin yaygınlaşmasıyla birlikte gap & flush yönetiminin daha hassas, daha hızlı ve daha öngörülebilir hale geleceği değerlendirilmektedir.

KAYNAKÇA

Braun, A., Styliadis, K., & Söderberg, R. (2020). Cognitive quality: An unexplored perceived quality dimension in the automotive industry. *Procedia CIRP*, 91, 869–874.

D’Emilia, G., Gaspari, A., Iavicoli, C., & Natale, E. (2020). Measurement uncertainty estimation of gap and profile in the automotive sector. *Journal of Physics: Conference Series*, 1589(1), 012017.

Pang, F., Huang, X., & Chen, C. (2024). Research on the influence of vehicle durability vibration on gap flush of exterior trim parts. *Vibroengineering Procedia*, 54, 40–45.

Pogson, I. (2020). *The assessment of automotive perceived quality* (Doctoral dissertation, Coventry University).

- Tran, T. T., & Ha, C. (2018). Non-contact gap and flush measurement using monocular structured multi-line light vision for vehicle assembly. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 16(5), 2432–2445.
- Wang, H., Li, M., & Wei, Q. (2021). Virtual matching measurement of gap and flush. In *2021 14th International Symposium on Computational Intelligence and Design (ISCID)* (pp. 192–197). IEEE.

Project Management Practices in the Automotive Industry: Processes, Methods, and Strategic Impact

Hami GÜLER

hami.guler@tofas.com.tr; Tofaş Türk Otomobil Fabrikası Ar-Ge, Bursa / Türkiye.

Özet

Otomotiv sektöründe proje yönetimi, ürün geliştirme süreçlerinin karmaşıklığı ve son derece rekabetçi pazar koşulları nedeniyle stratejik öneme sahiptir. Modern araç geliştirme projeleri, tasarım, mühendislik, tedarik zinciri yönetimi, kalite kontrol ve üretim dahil olmak üzere birçok disiplinin koordineli çabasını gerektirir. Bu nedenle, başarılı proje yürütme için sistematik, iyi planlanmış ve entegre bir proje yönetimi yaklaşımı şarttır. Bu makale, otomotiv sektöründeki proje süreçlerinin temel aşamalarını, yani kavram geliştirme, ürün tasarımı, prototip geliştirme, doğrulama ve seri üretime geçişi incelemektedir. Her aşamada uygulanan yöntemler ve yönetim araçları, özellikle zaman, maliyet ve kalite hedeflerinin dengelenmesine odaklanılarak analiz edilmektedir. Çalışma ayrıca, aşama-kapı metodolojisi, çevik proje yönetimi uygulamaları ve disiplinler arası iş birliği gibi yaygın olarak benimsenen yaklaşımların proje başarısı üzerindeki etkisini de değerlendirmektedir. Ayrıca, dijitalleşme, simülasyon teknolojileri ve veri odaklı karar verme süreçlerinin proje verimliliğini artırmadaki rolü de tartışılmaktadır. Bulgular, etkili proje yönetiminin ürün geliştirmeyi önemli ölçüde hızlandırdığını, maliyetleri optimize ettiğini ve kalite hedeflerine ulaşmayı desteklediğini göstermektedir. Bu çalışma, otomotiv şirketleri ve proje yöneticileri için pratik bilgiler ve rehberlik sağlamayı amaçlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Proje yönetimi, otomotiv endüstrisi, aşama-kapı modeli, çevik metodoloji, ürün geliştirme, dijitalleşme, disiplinler arası iş birliği

Abstract

Project management in the automotive industry holds strategic importance due to the complexity of product development processes and highly competitive market conditions. Modern vehicle development projects require the coordinated effort of multiple disciplines, including design, engineering, supply chain management, quality control, and manufacturing. Therefore, a systematic, well-planned, and integrated project management approach is essential for successful project execution. This paper examines the fundamental stages of project processes in the automotive industry, covering concept development, product design, prototype development, validation, and transition to mass production. The methods and management tools applied at each stage are analyzed, with a particular focus on balancing time, cost, and quality objectives. The study also evaluates the impact of widely adopted approaches such as stage-gate methodology, agile project management practices, and interdisciplinary collaboration on project success. Furthermore, the role of digitalization, simulation technologies, and data-driven decision-making in enhancing project efficiency is discussed. The findings indicate that effective project management significantly accelerates product development, optimizes costs, and supports the achievement of quality targets.

This study aims to provide practical insights and guidance for automotive companies and project managers.

Keywords: Project management, automotive industry, stage-gate, agile methodology, product development, digitalization, interdisciplinary collaboration

INTRODUCTION

The automotive industry is one of the most technologically advanced and globally competitive manufacturing sectors. Rapid technological developments, strict safety regulations, sustainability targets, and changing customer expectations continuously increase the complexity of vehicle development processes (Project Management Institute [PMI], 2017). Automotive manufacturers must coordinate large-scale projects involving product engineering, manufacturing systems, supply chain management, software integration, validation activities, and market launch processes. Therefore, effective project management practices have become essential for maintaining operational efficiency and strategic competitiveness.

Traditionally, automotive product development projects were managed using sequential and highly structured project management approaches based on detailed planning and documentation systems. However, the rise of electric vehicles, autonomous driving technologies, connected mobility systems, and software-defined vehicles has transformed traditional project execution models (Askarpour et al., 2024). Automotive companies increasingly combine conventional engineering management practices with Agile and hybrid project management methodologies to improve flexibility, innovation speed, and adaptability.

Global automotive manufacturers such as Toyota, Volkswagen, BMW, and Tesla have significantly invested in advanced project management systems to reduce development time and improve product quality. Stage-gate project management systems remain widely used for controlling engineering milestones and quality verification activities throughout the vehicle development lifecycle (PMI, 2017). At the same time, Agile methodologies are becoming more common in software-intensive automotive projects due to their iterative and adaptive structure (Heine & Palm, 2023).

Another major factor affecting automotive project management is digital transformation. Automotive companies increasingly utilize digital twins, enterprise resource planning systems, simulation technologies, artificial intelligence, and real-time data monitoring systems to improve project visibility and decision-making capabilities (Heine & Palm, 2023). These technologies enable faster communication between engineering teams, suppliers, and production facilities while improving risk monitoring and resource optimization.

Sustainability has also become a critical dimension of automotive project management. Environmental regulations, carbon neutrality targets, and electrification strategies require automotive firms to integrate sustainability objectives into project planning and execution processes (Soares et al., 2022). Consequently, project managers are expected not only to achieve time, cost, and quality objectives but also to support environmental and social responsibility goals.

This study aims to examine project management practices in the automotive industry by analyzing commonly used methodologies, organizational approaches, and their strategic impact on operational performance and innovation capability.

METHODOLOGY

This study adopts a qualitative research methodology based on a comprehensive literature review and comparative analysis of project management practices in the automotive industry. Academic publications, industry reports, technical studies, and case examples published between 2015 and 2025 were examined to identify commonly used project management processes and methodologies within automotive organizations.

The research focused on several major themes including project planning, stage-gate systems, Agile implementation, Lean management, risk management, stakeholder coordination, digital transformation, and sustainability integration. In addition, the study evaluated the strategic role of project management in improving operational efficiency and innovation performance.

The analysis included the examination of traditional Waterfall project management systems, Agile methodologies, Lean manufacturing principles, and hybrid project management approaches used by automotive manufacturers (Pitagorsky, 2006). Comparative evaluation was conducted to understand how these methodologies contribute to product development speed, cost optimization, organizational flexibility, and market responsiveness.

Secondary data sources were systematically reviewed to identify recurring trends and strategic challenges in automotive project execution. The findings were interpreted based on the relationship between project management maturity and organizational competitiveness.

FINDINGS

The findings indicate that project management has become one of the most critical organizational capabilities within the automotive industry. One of the most significant observations is the increasing adoption of hybrid project management systems that combine structured engineering control with Agile flexibility.

Traditional project management methodologies remain highly important for large-scale vehicle development and manufacturing projects due to their emphasis on documentation, milestone control, and regulatory compliance (PMI, 2017). Automotive manufacturers continue to use stage-gate systems

to manage concept approval, prototype validation, testing activities, industrialization, and production readiness processes.

Stage-gate systems divide vehicle development into multiple phases including concept development, engineering design, prototype manufacturing, validation testing, pilot production, and mass production. Each phase contains predefined quality checks, technical reviews, and management approval mechanisms designed to reduce project risk and improve product reliability.

However, Agile methodologies are increasingly used in software-intensive automotive projects such as autonomous driving systems, infotainment platforms, connectivity solutions, and electric vehicle software architecture (Askarpour et al., 2024). Agile project management enables faster iteration cycles, continuous feedback, and improved responsiveness to changing technical requirements.

The findings also demonstrate that Lean management principles significantly contribute to operational efficiency and waste reduction in automotive projects. Lean approaches focus on continuous improvement, process standardization, value stream optimization, and resource efficiency (Pitagorsky, 2006). Toyota Production System principles remain highly influential in automotive project and operations management worldwide.

Risk management emerged as another critical project management practice. Automotive projects involve substantial financial investments, complex supplier networks, and technological uncertainties. Effective risk assessment enables organizations to identify potential supplier disruptions, engineering delays, quality issues, and production bottlenecks at early stages (Soares et al., 2022). The COVID-19 pandemic further demonstrated the importance of resilient and flexible project management systems capable of responding to global supply chain disruptions.

Digital transformation technologies are also significantly reshaping automotive project management processes. Automotive companies increasingly utilize digital twins, artificial intelligence, enterprise resource planning systems, cloud-based collaboration platforms, and simulation technologies to improve project monitoring and communication (Heine & Palm, 2023). These technologies enable real-time performance tracking and enhance coordination between global engineering teams and suppliers.

Stakeholder management was identified as another major success factor. Automotive projects require close coordination between engineers, suppliers, regulatory authorities, production teams, investors, and customers. Effective communication systems and interdisciplinary collaboration improve project alignment and reduce organizational conflicts.

Finally, sustainability has become an integrated component of project management practices. Automotive firms increasingly incorporate carbon reduction targets, sustainable manufacturing processes, battery recycling strategies, and environmentally responsible supply chain management into project planning activities (Soares et al., 2022).

Digital transformation is another major factor influencing project management practices. Automotive firms increasingly utilize digital tools such as enterprise resource planning systems, artificial intelligence, simulation technologies, and digital twins to improve project monitoring and decision-

making. These technologies enable real-time communication and data analysis, reducing project delays, and increasing coordination between departments and suppliers.

The study further reveals that stakeholder management is essential for successful project execution. Automotive projects involve collaboration among engineers, suppliers, government agencies, customers, and investors. Effective communication and coordination help organizations maintain project alignment and reduce conflicts between stakeholders. Companies with strong stakeholder engagement strategies demonstrate higher levels of project success and customer satisfaction.

In addition, sustainability has become an important strategic objective integrated into project management processes. Automotive manufacturers are increasingly focusing on environmentally friendly production systems, carbon reduction initiatives, and sustainable supply chain management. Project managers are expected to balance economic performance with environmental and social responsibilities. The transition toward electric vehicles has accelerated the importance of sustainability-oriented project planning.

RESULT AND DISCUSSION

The analysis demonstrates that project management in the automotive industry has evolved from a purely technical and operational activity into a strategic organizational capability. Increasing technological complexity and rapid market transformation requires automotive firms to adopt flexible, integrated, and data-driven project management systems.

The integration of traditional, Agile, and Lean methodologies reflects the industry's need to balance stability and flexibility simultaneously. Traditional methodologies provide strong process control and regulatory compliance, while Agile systems improve responsiveness and innovation capability (Askarpour et al., 2024). Hybrid approaches therefore offer significant advantages for managing multidisciplinary automotive projects.

One of the most important challenges identified in this study is the management of global supply chain complexity. Automotive manufacturers depend heavily on international supplier networks and synchronized logistics systems. Disruptions affecting one supplier or region can significantly impact global production operations. Consequently, risk mitigation and supply chain resilience have become critical dimensions of project management strategy (Soares et al., 2022).

Another major discussion point concerns leadership and organizational culture. Successful project execution requires strong leadership support, cross-functional collaboration, effective communication, and organizational learning capabilities. Companies that encourage innovation and knowledge sharing are better positioned to manage technological transformation and complex engineering projects (Heine & Palm, 2023).

The findings also suggest that advanced project management capabilities contribute directly to competitive advantage. Automotive companies that effectively manage innovative projects can introduce new technologies, improve product quality, and reduce development time more successfully than competitors. This capability is particularly important in electric vehicle markets where technological evolution occurs rapidly.

Despite these advantages, implementing modern project management systems also presents organizational challenges. Resistance to change, insufficient employee training, high implementation costs, and digital integration difficulties may reduce project management effectiveness. Therefore, continuous organizational learning and workforce development are essential for maximizing the benefits of modern project management methodologies.

In conclusion, project management has become a strategic driver of innovation, operational efficiency, and sustainable competitiveness in the automotive industry. The integration of digital transformation technologies, Agile methodologies, Lean systems, and sustainability-oriented planning significantly improves project performance and organizational adaptability. Automotive firms capable of integrating advanced project management practices into their organizational culture are more likely to achieve long-term success in an increasingly competitive and technology-driven market.

Future developments in electric mobility, artificial intelligence, autonomous driving systems, and smart manufacturing technologies will continue to reshape project management approaches within the automotive sector. Consequently, automotive organizations must continuously adapt their project management capabilities to address emerging technological and strategic challenges.

KAYNAKÇA

- Askarpour, M., Kokaly, S., & Ramesh, S. (2024). *An exploration of agile methods in the automotive industry: Benefits, challenges and opportunities*. arXiv. <https://arxiv.org/>
- Heine, J., & Palm, H. (2023). *Framework for continuous transition to agile systems engineering in the automotive industry*. arXiv. <https://arxiv.org/>
- Pitagorsky, G. (2006). *Agile and lean project management*. Project Management Institute.
- Project Management Institute. (2017). *Agile practice guide*. Project Management Institute.
- Soares, D., Silva, F. J. G., Ramos, S. C. F., et al. (2022). Identifying barriers in the implementation of agile methodologies in automotive industry. *Sustainability*, 14. <https://doi.org/>

Şeffaf Dış Lensli Otomotiv Arka Lambalarında UV Dayanımı: İç Bileşenlerin Bağımsız UV Stabilizasyona İhtiyacı

Başar UTAŞ

basar.utas@tofas.com.tr; Tofaş Türk Otomobil Fabrikası A.Ş., Ar-Ge Merkezi, Bursa / Türkiye.

Özet

Otomotiv dış aydınlatmasında lamba fonksiyonuna göre farklı dış lens malzemeleri kullanılmaktadır: yüksek darbe dayanımı ve karmaşık şekillendirilebilirliği nedeniyle far uygulamalarında PC (polikarbonat) tercih edilirken, üstün optik şeffaflığı ve UV kararlılığı sayesinde arka stop ve pozisyon lambalarında PMMA (Polimetilmetakrilat) ön plana çıkmaktadır. Giderek yaygınlaşan şeffaf dış lens tasarımları, iç lamba bileşenlerini geleneksel renkli lens tasarımlarına kıyasla çok daha yüksek ultraviyole (UV) radyasyonuna maruz bırakmaktadır. Bu makalede, şeffaf dış lenslere sahip arka lambalarda yalnızca dış lensin UV stabilizasyonunun iç bileşenleri korumak için yetersiz kaldığı savunulmaktadır. PMMA'dan üretilen optik gövdeler ve iç lensler ile PC veya PC-ABS malzemeden yapılan yapısal çerçeveler, UV kaynaklı bozunma mekanizmaları açısından birbirinden farklı davranışlar sergilemekte olup bu durum her bileşen için bağımsız malzeme seçimi ve tasarım önlemleri alınmasını zorunlu kılmaktadır. Makale, bu sorunu yapılandırılmış bir tasarım kısıtı olarak ele almakta ve bileşen bazlı UV stabilizasyon stratejilerine yönelik bir yaklaşım önermektedir.

Anahtar Kelimeler: çerçeve, malzeme uyumluluğu, otomotiv arka aydınlatması, PC, PC-ABS, PMMA, şeffaf dış lens, UV dayanımı.

Abstract

Automotive exterior lighting uses different outer lens materials depending on lamp function: PC (polycarbonate) is the standard choice for headlamps due to its high impact resistance and complex formability, while PMMA (Polimetilmetakrilat) is preferred for rear stop and tail lamps due to its superior optical clarity and UV stability. The growing trend toward clear outer lens designs exposes inner lamp components to significantly higher ultraviolet (UV) radiation than traditional tinted lens designs. This paper argues that the UV stabilization of the outer lens alone is insufficient to protect inner components in clear lens rear lamps. Optical blades and inner lenses made of PMMA, and structural bezels made of PC or PC-ABS, each face distinct UV-induced degradation mechanisms that must be addressed independently through material selection and design measures. The paper treats this problem as a structured design constraint and proposes a component-level approach to UV stabilization strategy.

Keywords: bezel, material compatibility, automotive rear lighting, PC, PC-ABS, PMMA, clear outer lens, UV durability.

GİRİŞ

Otomotiv dış aydınlatma tasarımında son yıllarda köklü bir estetik dönüşüm yaşanmaktadır. Geleneksel kırmızı veya sarı renkli dış lens uygulamalarının yerini, özellikle premium ve üst segment araçlarda tamamen şeffaf — saydam — dış lens tasarımları almaktadır. Bu eğilim, araç kimliğinin ve iç lamba mimarisinin dışarıdan görünür kılınması amacıyla tasarımcılar tarafından bilinçli olarak benimsenmektedir. Söz konusu geçiş yalnızca estetik bir tercih değil; aynı zamanda mühendislik açısından yeni kısıtlar doğuran bir tasarım kararıdır.



Şekil 1. Otomotiv arka lambalarında renkli dış lens (geleneksel) ve şeffaf dış lens (güncel) tasarımlarının karşılaştırması (Audi, 2003; RD AUTO LIGHT SYSTEM, t.y.).

Renkli lensler, kendi pigment ve renk katkıları sayesinde UV radyasyonun önemli bir bölümünü filtreler ve lamba içini dolaylı olarak korur. Şeffaf lensler ise bu filtreleme işlevini yerine getirmez; dolayısıyla iç bileşenler doğrudan ve yüksek yoğunlukta UV radyasyonuna maruz kalır. Otomotiv arka lambalarında dış lens malzemesi olarak yaygın biçimde PMMA (polimetilmetakrilat) tercih edilmektedir; üstün optik şeffaflığı, yüzeye işlenebilirliği ve görece yüksek doğal UV kararlılığı bu tercihte belirleyici rol oynamaktadır.

Bir otomotiv arka lambasının iç yapısı birden fazla bileşen katmanından oluşmaktadır: estetik ve optik amaçlı PMMA lensler, ışığı yönlendiren ve şekillendiren PMMA optik gövdeler ve tüm bu yapıyı taşıyan, genellikle PC veya PC-ABS malzemeden üretilen yapısal çerçeveler. Bu bileşenler birbirinden farklı malzeme bileşimlerine ve dolayısıyla farklı UV bozunma mekanizmalarına sahiptir.



Şekil 2. Otomotiv arka lamba yapısı — Dışta şeffaf/siyah PMMA lens, içeride şeffaf PMMA optik gövdeler, kırmızı PC çerçeve üstü siyah kaplama (Lasercoating, UV koruma) (Clymo, R., 2025).

Bu çalışma, şeffaf dış lens tasarımının getirdiği artan UV yükü bağlamında, yalnızca dış lensin stabilizasyonunun iç bileşenleri korumak için neden yetersiz kaldığını literatür bulguları ışığında tartışmakta ve her bileşen için bağımsız UV stabilizasyon stratejisi geliştirilmesinin gerekliliğini ortaya koymaktadır.

YÖNTEM

Bu çalışma, deneysel veri içermeyen bir literatür taraması ve malzeme analizi çalışmasıdır. PMMA ve PC/PC-ABS malzemelerinin UV bozunma davranışları, hakemli dergilerde yayımlanmış deneysel çalışmalar ve alanın temel başvuru kaynakları temel alınarak incelenmiştir. Bozunma mekanizmaları, gözlemlenen fiziksel ve kimyasal değişiklikler açısından karşılaştırılmış; bulgular otomotiv arka lambası tasarım bağlamına uyarlanarak değerlendirilmiştir.

BULGULAR

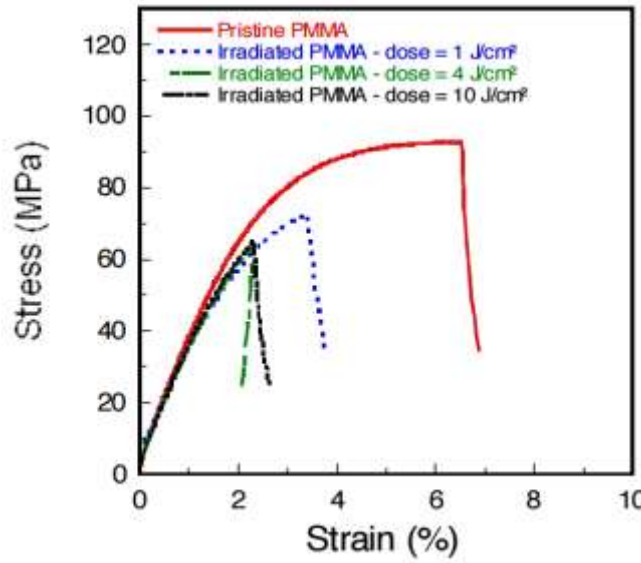
PMMA'nın UV Bozunma Davranışı

PMMA, optik şeffaflığı ve görece yüksek UV direnci nedeniyle dış lens ve optik bileşen uygulamalarında tercih edilen bir polimer malzemedir. Bununla birlikte, yeterli dozda UV radyasyonuna maruz kaldığında belirgin fiziksel ve optik bozunma göstermektedir. Wypych (2020), PMMA'da iki temel bozunma yolunun varlığını ortaya koymaktadır: “doğrudan ana zincir kırılması” ve “ester yan zinciri ayrılması”. Doğrudan ana zincir kırılması 300 nm dalga boyunda gerçekleşir; bu dalga boyu güneş ışığının yeryüzüne ulaşan bileşenleri içinde yer aldığından, söz konusu reaksiyon açık hava koşullarında mümkündür. Ester yan zinciri ayrılması ise 260–280 nm’de tetiklenir; ancak bu süreçte oluşan serbest radikaller oksijen varlığında fotooksidatif reaksiyonlar zinciri başlatabilmektedir. Tipik bozunma sonuçları olarak moleküler ağırlık azalması ve çatlama (crazing) öne çıkmaktadır (Wypych, 2020).

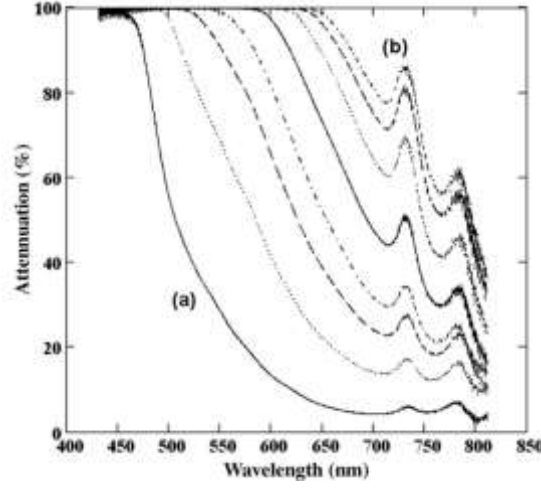
Eve ve Mohr (2009), güçlü çapraz bağlı PMMA malzeme üzerinde gerçekleştirdikleri deneysel çalışmada UV ışıması dozunun artmasıyla birlikte kırılma dayanımı ve uzamanın %30’un üzerinde düştüğünü belgelemiştir. 2 J/cm² eşik dozundan itibaren malzeme davranışı sünekten kırılana

dönüşmektedir. Bu bozunma; depolimerizasyon, ana zincir kırılması ve karbometoksi yan grup ayrılması gibi fotokimyasal reaksiyonların sonucunda polimer zincir uzunluğunun ksalmasına bağlıdır. Zincir ksalması, malzemenin moleküler ağırlığını düşürerek hem mekanik hem de optik özelliklerini kalıcı biçimde bozar. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri, UV maruziyeti sonrası yüzey pürüzleşmesi ve çatlak oluşumunu açıkça ortaya koymaktadır.

Taguenang ve diğerleri (2008), 254 nm dalga boyunda UV ışımaya maruz bırakılan PMMA optik fiberlerde iletim gücünün dramatik biçimde azaldığını göstermiştir. Raman spektroskopisi, UV maruziyeti hemen ardından PMMA'ya özgü piklerin neredeyse tamamen kaybolduğunu ortaya koymuştur; bu durum, PMMA moleküllerinin büyük ölçüde ayrılmış olduğunu ve birden fazla bozunma ürünü oluştuğunu kanıtlamaktadır. Kısmi optik iyileşme gözlemlense de iletim değerleri başlangıç seviyesine tam olarak dönmemekte; dolayısıyla kalıcı moleküler hasar oluşmaktadır. Optik gövdeler ve iç lensler gibi ışık iletiminden sorumlu bileşenler için bu sonuç doğrudan fonksiyon kaybı anlamına gelmektedir.



Şekil 3. PMMA'da UV dozu ile kırılma dayanımı ve uzama değişimi — Eve ve Mohr (2009)'dan alınan gerilme-uzama eğrileri (Procedia Engineering, 1(1), s.239, Fig.1).

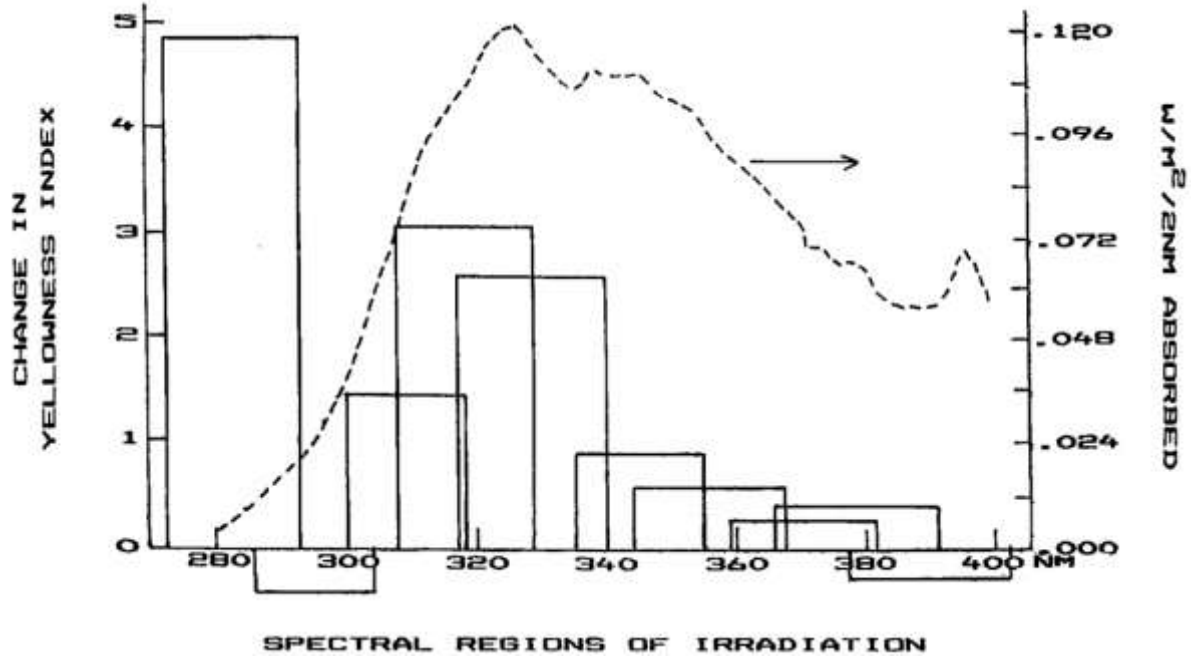


Şekil 4. *PMMA optik fiberlarda UV maruziyeti sonrası iletim zayıflaması ve iyileşme eğrileri — Taguenang ve diğerleri (2008)'den (Optics Communications, 281(8), s.2090, Fig.1–2).*

PC ve PC-ABS'nin UV Bozunma Davranışı

Polikarbonat (PC) ve PC-ABS alaşımları, otomotiv lambalarında yapısal çerçeve ve gövde bileşenleri olarak yaygın biçimde kullanılmaktadır. PC'nin yüksek darbe dayanımı ve şekillendirilebilirliği bu uygulamalar için tercih nedenidir. Ancak PC, UV radyasyonuna karşı doğal direnci düşük bir malzemedir ve stabilize edilmediği takdirde hızla bozunmaktadır. Wypych (2020)'e göre PC'nin fotobozunması, “kısa dalga boylarında (<300 nm) foto-Fries yeniden düzenlemesi” ve “uzun dalga boylarında (310–350 nm) ise oksijen kaynaklı foto-oksidasyon” olmak üzere iki şekilde oluşur. Her iki mekanizma da sararmaya ve UV soğurma artışına yol açmakla birlikte, ürettikleri kromofor türleri ve bozunma hızları birbirinden farklıdır.

Andrady ve diğerleri (1992), bisfenol A polikarbonatın simüle edilmiş güneş radyasyonuna dalga boyu duyarlılığını deneysel olarak incelemiş ve bu iki mekanizmanın bağımsız varlığını aktivasyon spektrumu tekniğiyle kanıtlamıştır. Güneş ışığına maruziyet koşullarında baskın mekanizmanın foto-oksidasyon olduğu belirlenmiştir; foto-Fries yolunun dış ortam koşullarındaki katkısının ihmal edilebilir düzeyde kaldığı gösterilmiştir. Sayısal olarak: 449 saatlik hızlandırılmış yaşlandırma testinde stabilize edilmemiş PC numunesinde sararma indeksi (YI) 4,8 birimlik artış ölçülmüştür. UV stabilizatörün uzun dalga boylarına karşı daha etkili, kısa dalga boylarına karşı ise yetersiz kaldığı ayrıca belgelenmiştir.



Şekil 5. PC'de UV dalga boyu aktivasyon spektrumu — sararma indeksi değişimine göre kısa ve uzun dalga boyu bölgelerinin katkıları — Andradı ve diğerleri (1992)'den (Polymer Degradation and Stability, 35(3), s.242, Fig.7a).

PC için stabilizatör seçiminde önemli bir kısıt mevcuttur: Wypych (2020), konvansiyonel tetramethyl-piperidinyl bazlı HALS türlerinin PC veya PC-ABS alaşımlarında zincir kırılmasına ve mekanik özellik kaybına yol açtığını belgelemektedir. Bu durum, PC/PC-ABS çerçeve bileşenlerinde stabilizatör seçiminin yalnızca UV absorpsiyon etkinliğine değil, polimer kimyasıyla uyumluluğuna da göre belirlenmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Bağımsız Stabilizasyon Gerekliliği

İki malzeme grubunun bozunma mekanizmaları ve stabilizatör kısıtları bir arada değerlendirildiğinde belirgin bir ayrışma ortaya çıkmaktadır. Bu farklılıklar Tablo 1'de özetlenmiştir.

Tablo 1. PMMA ve PC/PC-ABS bileşenlerinin UV bozunma özelliklerinin karşılaştırması.

Özellik	PMMA (Optik gövde / Lens)	PC / PC-ABS (Çerçeve)
Baskın mekanizma	Ana zincir kırılması; ester yan zinciri ayrılması	Foto-oksidasyon; foto-Fries yeniden düzenlemesi
Kritik dalga boyu	300 nm (zincir kırılması); ≤320 nm	<300 nm (foto-Fries); 310–350 nm (foto-oksidasyon)
Dışa yansımaları	Kırılma, çatlama, optik iletim kaybı	Sararma, şeffaflık kaybı, yüzey erozyonu
Uygun stabilizatör	Benzotriazol tipi UVA + HALS (sinerjistik)	Benzotriazol / hidroksifeniltriiazin tipi UVA; PC-uyumlu HALS seçimi zorunlu

Şeffaf dış lensin UV stabilizasyonu yalnızca o lensi korur; lens içinden geçen UV radyasyon iç bileşenlere ulaşmaya devam eder. Geleneksel renkli lenslerle kıyaslandığında, şeffaf lens tasarımı iç bileşenlerin maruz kaldığı UV miktarını önemli ölçüde artırmaktadır. PMMA için ihtiyaç duyulan benzotriazol tipi UV absorber ile HALS kombinasyonunun PC'de sorun yaratma riski taşıdığı düşünüldüğünde, "dış lensi stabilize et, geri kalan bileşenler için aynı formülasyonu uygula" yaklaşımının hem teknik hem de güvenlik açısından yetersiz kaldığı açıktır. Her bileşen, kendi malzeme kimyasına uygun ve bağımsız bir stabilizasyon stratejisi gerektirmektedir

SONUÇ VE TARTIŞMA

Bu çalışma, şeffaf dış lenslere sahip otomotiv arka lambalarında UV stabilizasyonunun sistem düzeyinde ele alınması gerektiğini ortaya koymaktadır. Dış lensin UV stabilizasyonu gerekli olmakla birlikte tek başına yeterli değildir.

PMMA'dan üretilen optik gövdeler ve iç lensler, UV maruziyeti sonucunda mekanik kırılma ve optik iletim kaybı riski taşımaktadır. PC veya PC-ABS'den üretilen yapısal çerçeveler ise foto-oksidasyon kaynaklı sararma ve şeffaflık kaybına karşı savunmasızdır. Her iki bozunma türü farklı kimyasal mekanizmalara dayandığından, farklı stabilizatör türü ve konsantrasyonu gerektirmektedir. Üstelik PC için konvansiyonel HALS kullanımının zincir kırılmasına neden olabileceği göz önüne alındığında, stabilizatör seçimi yalnızca UV dayanımı değil, polimer kimyasıyla uyumluluk açısından da ayrıca değerlendirilmek zorundadır.

Lamba tasarımcıları ve malzeme mühendisleri için pratik çıkarım şudur: UV stabilizasyon stratejisi, lamba içindeki her bileşen bazında ayrıca değerlendirilmelidir. Bu değerlendirme; malzeme seçimi aşamasında UV soğurucu ve/veya uygun HALS katkı maddelerinin formülasyona dahil edilmesini, bileşen bazında hızlandırılmış yaşlandırma testlerinin (örn. QUV, ksenon ark) planlanmasını ve şeffaf lens tasarımında artan UV transmisyonunun yarattığı ek yükün hesaba katılmasını kapsamalıdır.

Gelecek çalışmalar, farklı UV stabilizatör formülasyonlarına sahip PMMA optik gövde ve PC/PC-ABS çerçeve numunelerinin gerçek lamba geometrisi içinde hızlandırılmış yaşlandırma testlerine tabi tutulmasıyla bu çalışmada sunulan argümanı deneysel verilerle güçlendirebilir. Özellikle şeffaf dış lens transmisyon profilinin iç bileşenler üzerindeki UV yük dağılımına etkisinin deneysel olarak modellenmesi önemli bir araştırma sorusunu oluşturmaktadır.

KAYNAKÇA

Andrady, A. L., Searle, N. D. ve Crewdson, L. F. E. (1992). Wavelength sensitivity of unstabilized and UV stabilized polycarbonate to solar simulated radiation. *Polymer Degradation and Stability*, 35(3), 235–247.

Audi. (2003). Audi 80 Avant– Audi Media Center [Fotoğraf]. <https://www.audi-mediacycenter.com/en/photos/detail/audi-80-avant-1176> adresinden alındı.

Clymo, R. (2025). DS No8 rear lights [Fotoğraf]. <https://www.stuff.tv/news/the-deliberately-quirky-ds-no8-impressed-me-both-inside-and-out/> adresinden alındı.

Eve, S. ve Mohr, J. (2009). Study of the surface modification of the PMMA by UV-radiation. *Procedia Engineering*, 1(1), 237–240.

RD AUTO LIGHT SYSTEM. (t.y.). *Illuminate the Future: Where Artistry Meets Innovation in Automotive Lamp Sketching and Optic Design* [Görsel]. <https://www.rdautolight.com/automotive-lamp-sketching-and-optic-design/> adresinden alındı.

Taguenang, J. M., Kassu, A., Ruffin, P. B., Brantley, C., Edwards, E. ve Sharma, A. (2008). Reversible UV degradation of PMMA plastic optical fibers. *Optics Communications*, 281(8), 2089–2092.

Wypych, G. (Ed.) (2020). *Handbook of UV Degradation and Stabilization* (3. baskı, s.235–239, 260–262). ChemTec Publishing.

Welding and Characterization of PH17-7 and PH 17-7 Stainless Steel Alloys via Autogenous Laser Welding

Kübilay Öztürk^{1,2}, Prof. Dr. Alptekin Kısasöz¹, Doç.Dr. Mustafa Tümer³

¹Yıldız Technical University Department of Metallurgical and Materials Engineering, Istanbul, Türkiye

²Tofas Turk Otomobil Fabrikası A.S R&D Center, Bursa, Türkiye

³Kocaeli University, Welding Technology Program, Kocaeli, Türkiye

Özet

Bu çalışma, 1,3 mm kalınlığındaki PH 17-7 (AISI 631) çökelme sertleşmeli paslanmaz çeliğin otojen robotik lazer ışın kaynağı (LBW) ile birleştirilen numunelerinin mikroyapısal ve mekanik karakteristiklerini incelemektedir. Kaynaklı birleştirmeler, metalografik inceleme ve enine çekme testleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Mikroyapı analizi, kaynak metalinde (erime bölgesi) baskın bir dendritik büyüme morfolojisi ortaya koyarken; ısıdan etkilenen bölgenin (ITAB) tane kabalaşması, delta ferrit kalıntısı ve karbür dönüşümleri sergilediği gözlemlenmiştir. Mekanik değerlendirmeler, tüm numunelerin tutarlı bir şekilde kaynak dikişi bölgesinden koptuğunu göstermiştir. Bu kopma lokasyonuna rağmen, kaynaklı birleştirmeler ortalama 725 MPa çekme dayanımı ve %27 uzama sergilemiştir. Fraktografik analizler, yaygın çukurcuk (dimple) oluşumu ile karakterize edilen sünek bir kırılma mekanizmasını doğrulamış; bu durum kaynaklı yapının önemli bir enerji sönmüleme kapasitesine sahip olduğunu kanıtlamıştır.

Anahtar Kelimeler: Lazer Kaynak, Mikroyapı, PH17-7

Abstract

This study investigates the microstructural and mechanical characteristics of 1.3 mm thick PH 17-7 (AISI 631) precipitation-hardening stainless steel joined via autogenous robotic laser beam welding (LBW). The joints were evaluated using metallographic examination and transverse tensile testing. Microstructural analysis revealed a predominantly dendritic growth morphology in the fusion zone, while the heat-affected zone (HAZ) exhibited grain coarsening, delta ferrite retention, and carbide transformations. Mechanical evaluations showed that all specimens consistently fractured at the weld seam. Despite this, the welded joints exhibited an average ultimate tensile strength (UTS) of 725 MPa and an elongation of 27%. Fractographic analysis confirmed a ductile fracture mechanism characterized by extensive dimple formation, indicating significant energy absorption capacity within the weldment.

Keywords: Laser Welding, Microstructure, PH17-7

INTRODUCTION

Precipitation-hardening (PH) stainless steels, particularly PH 17-7 (AISI 631), are essential in high-performance sectors such as aerospace and automotive due to their unique combination of high strength, corrosion resistance, and good formability. Achieving structural integrity in these materials during joining is critical for their functional reliability.

Laser Beam Welding (LBW) is a preferred joining technology for thin-section materials due to its high energy density, narrow heat-affected zone (HAZ), and minimal thermal distortion. The integration of robotic systems into LBW further enhances process repeatability and precision. This study aims to characterize the metallurgical and mechanical performance of PH 17-7 butt joints produced by robotic laser welding, focusing on the relationship between microstructural evolution and fracture behavior (ASM International, 1994; ASTM International, 2021; Davis, 1994; Haboudou et al., 2003; Kou, 2003; Lippold & Kotecki, 2005; Padilha & Rios, 2002).

METHOD

Material Selection

The base material used in this study is PH 17-7 (AISI 631) precipitation-hardening stainless steel. The specimens were prepared as sheets with a thickness of 1.3 mm. Prior to welding, the surfaces were mechanically cleaned and degraded to ensure optimal beam-material interaction.

Robotic Laser Welding Procedure

The joining process was performed using an automated robotic laser welding system in a square butt-joint configuration. The robotic arm ensured a precise and consistent welding trajectory. To ensure statistical reliability and minimize experimental error, three repetitions were conducted for each joint. The robotic process was depicted in Figure 1.



Figure 1. Robotic Welding System

Characterization Techniques

Following the welding process, specimens were sectioned for analysis:

The specimens cutting schema and welded parts were displayed in Figure 2.

- **Metallographic Examination:** Samples were prepared through standard grinding and polishing procedures, followed by etching to reveal the microstructural features of the Fusion Zone (FZ) and HAZ.
- **Mechanical Testing:** Three transverse tensile test specimens were extracted from the welded plates to evaluate the tensile strength and elongation.
- **Fractography:** After the tensile tests, the fracture surfaces were examined to determine the failure mechanism.

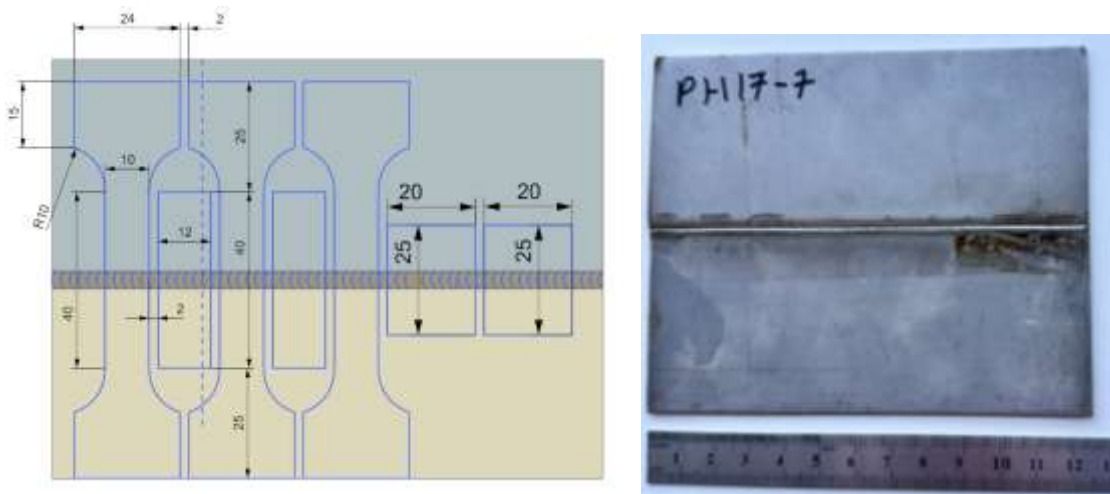


Figure 2. Characterization specimens' preparation cutting schema and welded parts

RESULTS AND DISCUSSION

Microstructural Analysis

The macroscopic investigation showed full penetration and a uniform weld bead profile, indicating the stability of the robotic laser process.

Microstructural analysis of the Fusion Zone (FZ) revealed a distinct dendritic growth pattern, a result of the rapid solidification rates inherent to LBW. In the Heat-Affected Zone (HAZ), significant changes were observed:

1. **Grain Coarsening:** High heat input locally led to increased grain size near the fusion line.
2. **Phase Transformations:** The presence of delta ferrite was detected within the matrix.
3. **Carbide Transformations:** Carbide precipitations and transformations were identified, which play a major role in the local mechanical properties. The microstructure of welded parts were shown in Figure 3.

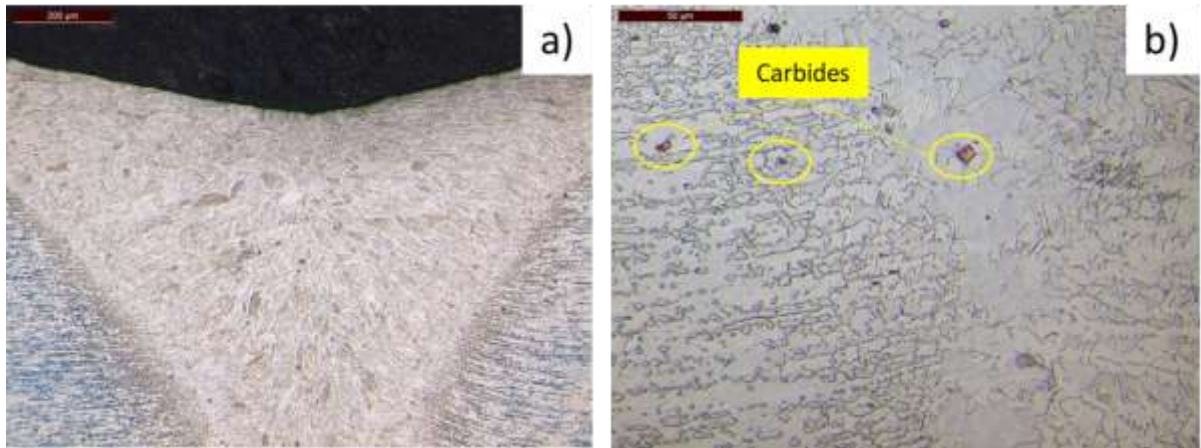


Figure 3. Microstructure of PH17-7 Laser Welded parts **a)** welding seam **b)** HAZ region

Mechanical Performance and Fractography

The transverse tensile tests provided consistent results across all three repetitions. Every specimen failed at the weld seam (Fusion Zone), identifying it as the critical region of the joint.

The mechanical values recorded were:

- **Ultimate Tensile Strength (UTS):** 725 MPa (Average)
- **Elongation:** 27% (Average)

The fracture at the weld seam is attributed to the "as-cast" dendritic structure and the dissolution of strengthening precipitates during the welding thermal cycle. However, the fractographic analysis revealed a ductile fracture mode. The surfaces were characterized by a high density of microvoids or dimples, proving that the material underwent significant plastic deformation before failure. The fracture surface examination has been carried out with SEM and images were depicted in Figure 4.

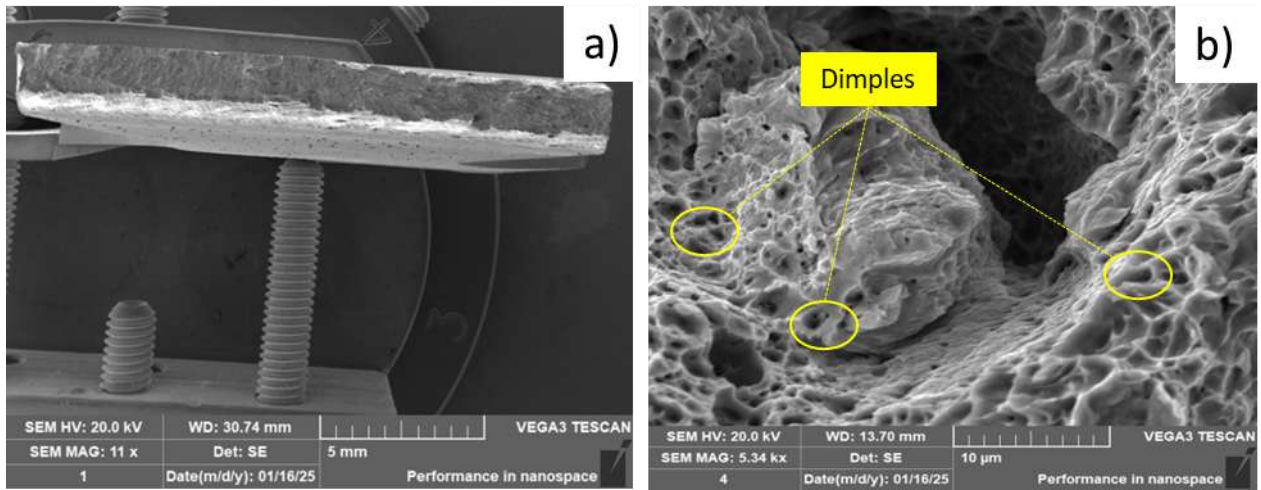


Figure 4. Fractured surface SEM images **a)** macrostructure **b)** higher magnification microstructure

CONCLUSION

Robotic laser welding of 1.3 mm PH 17-7 sheets resulted in stable, full-penetration joints with high repeatability.

The Fusion Zone exhibited dendritic morphology, while the HAZ showed grain coarsening and carbide transformations.

Tensile tests yielded a UTS of 725 MPa and 27% elongation, with all failures occurring in the weld zone.

Despite fracturing at the weld, the presence of dimples on the fractured surface confirms a ductile failure mechanism and good joint toughness.

REFERENCE

ASM International. (1994). *ASM handbook: Volume 6. Welding, brazing, and soldering*. ASM International.

ASTM International. (2021). *Standard test methods for tension testing of metallic materials (ASTM E8/E8M-21)*. West Conshohocken, PA.

Davis, J. R. (Ed.). (1994). *Stainless steels*. ASM International.

Haboudou, A., Lambertin, M., Vannes, A. B., & Peix, G. (2003). Reduction of porosity in laser welded Al alloys and steel. *Materials Science and Engineering: A*, 363(1-2), 40-52.

Kou, S. (2003). *Welding metallurgy* (2nd ed.). John Wiley & Sons.

Lippold, J. C., & Kotecki, D. J. (2005). *Welding metallurgy and weldability of stainless steels*. John Wiley & Sons.

Padilha, A. F., & Rios, P. R. (2002). Microstructure and main properties of austenitic stainless steels. *Materials Research*, 5(3), 225-248.

Araç Elektrik Elektronik Mimarisi Ve Haberleşme Ağının Evrimi

Uzman Sistem Mühendisi Berkant Ahmet Tofaş Arge E&E Sistemler Müdürlüğü
berkant.ahmet@tofas.com.tr

Uzman Araç Elektronik Mimarı Sıla Bozen Taşçı Tofaş Arge E&E Sistemler Müdürlüğü
sila.bozen@tofas.com.tr

Özet

Gelişmiş sürücü destek sistemlerinin (ADAS), bilgi-eğlence sistemlerinin, uzaktan kontrol ve uzaktan bağlantı teknolojilerinin araçlarda yaygınlaşması, araç elektronik mimarilerinin eklenen teknolojilere hazır hale getirilmesini zorunlu kılmaktadır. Yeni teknolojik sistemlerin gelişmesi için araca eklenen komponentler ve bunlara bağlı olarak kullanılan haberleşme ağları ise araç mimarilerinin zamanla kapasite açısından yetersiz kalmasına, yeni araç elektronik mimarilerinin oluşumuna sebep olmuştur. Eklenen komponentler ve haberleşme ağlarının fazlalığı ile mimari üzerindeki değişimleri yönetmek oldukça zorlaşmış, ve yenilikçi bir çözüm olarak Zonal mimariler yaygınlaşmaya başlamıştır. Aynı zamanda elektronik kontrol ünitelerinin arasında veri alışverişinin artması ile var olan haberleşme ağlarının veri iletme hızının yetersiz kalması, yeni haberleşme ağlarının (CANFD, Ethernet vb.) kullanım ihtiyacını ortaya çıkarmıştır. Bu makalede, araç mimarilerinin tarihsel gelişimi ve bu doğrultuda değişen araç içi iletişim ağları sistematik olarak incelenmiştir. Farklı mimarilerin avantaj ve dezavantajları detaylı analizlerle karşılaştırılmış, araç içi iletişim ağ yapıları bant genişliği gereksinimleri, gecikme toleransları ve araç üzeri uygulanabilirliği detaylandırılarak araç mimari ve haberleşme ağlarının geçmişten bugüne kadar gelişimi ele alınmıştır.

Anahtar Kelimeler: Araç Elektronik Mimarisi, Fonksiyon Bazlı Elektronik Mimarisi, Bölgesel Mimari, Ethernet, Geleneksel(legacy)Mimari

EVALUATION OF VEHICLE ELECTRONIC ARCHITECTURE AND NETWORK

Abstract

Due to regulations, customer expectations, and various other factors, Advanced Driver Assistance Systems (ADAS) and Infotainment systems have continued to evolve. Additionally, the implementation of remote control and connectivity technologies in vehicles has enabled users to experience new functionalities. As components are added to support these developments, and with the growing communication demands among them, existing communication networks have become insufficient in terms of capacity, leading to the emergence of new architectural approaches. With the increasing number of components and communication networks, system management has become more complex, prompting a shift towards Zonal architecture. Furthermore, as data exchange between electronic control units (ECUs) has significantly increased, the data transmission speeds of current communication networks have become inadequate. This has created a need for new communication technologies such as CAN FD and Ethernet. This article systematically examines the historical development of vehicle architecture and the evolution of in-vehicle communication networks. The advantages and

disadvantages of various architectural approaches are analyzed in detail. Additionally, the bandwidth requirements, latency tolerances, and integration capabilities of in-vehicle communication network structures are compared to provide a comprehensive evaluation.

Keywords: Vehicle Electronic Architecture, Network Topology, Domain-oriented, Zone-oriented, Ethernet, Distributed Architecture

1. GİRİŞ

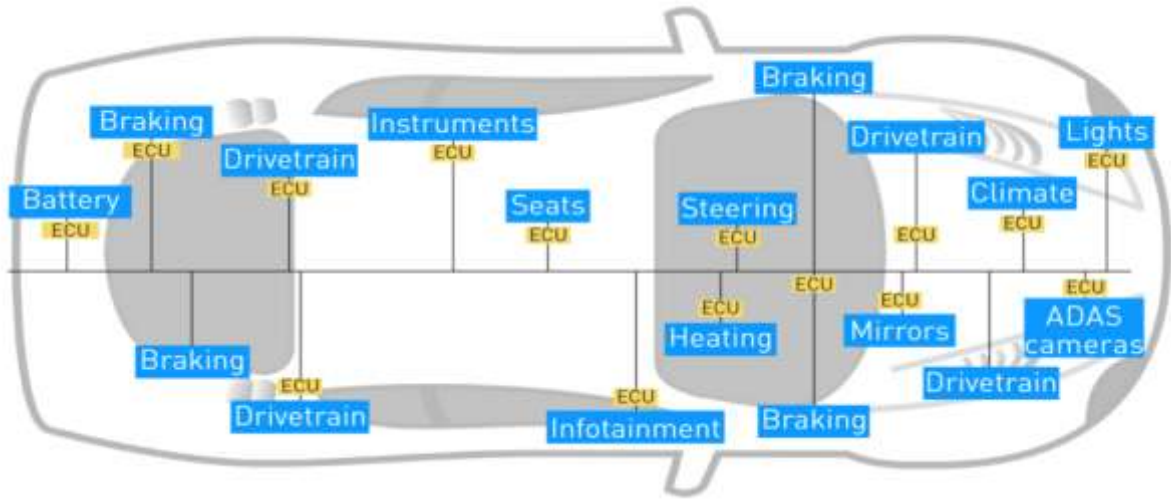
Elektrik Elektronik Mimarisi, bir araç içindeki elektrik ve elektronik sistemlerin düzenlenmesini ifade eder. Bu mimariler, modern araçlardaki çeşitli elektronik bileşenlerin ve sistemlerin artan karmaşıklığını ve entegrasyonunu karşılamak için yıllar içinde evrimleşmiştir. Araç elektroniğini 2 açıdan ele alabiliriz: Fiziksel alan ve veri alanı. Fiziksel alan araç mimarisi Elektronik Kontrol Üniteleri (EKÜ), sensörler, aktüatörler vb. gibi donanımların yerleşimini gösterirken araç mimarisi veri perspektifinden bakıldığında ise, EKÜ'ler arasındaki sinyal alışverişini ve bağlantıları gösterir. Araçlardaki mimarilerin evrimiyle birlikte, en temel mimarilerde yalnızca emisyon ve motor kontrolü için birkaç ECU bulunurken, zamanla araç fonksiyonlarının çeşitlenmesi ve karmaşıklaşmasıyla birlikte ECU sayısı hızla artmıştır. 1980–1990 döneminde yaklaşık 5–10 ECU kullanılırken, 1990–2000 yıllarında ABS, hava yastıkları, klima ve OBD-II'nin yaygınlaşmasıyla bu sayı 10–30'a çıkmıştır. 2000–2020 arasında lüks araçlarda 30–50 ECU bulunurken modern araçlarda bu sayı 70'e kadar yükselmiştir. 2020–2025 ve sonrasında ise BEV, FCEV ve ADAS sistemlerinin etkisiyle 100+ ECU yaygın hale gelmiş, bazı modellerde 150'ye kadar ECU kullanılmaktadır. [13] Elektronik kontrol ünitelerinin artmasıyla başlayan karmaşık veri ağı hatları, araç için bir ağırlık sorunu yaratmıştır. Modern araçlar, ADAS bileşenleri, bilgi-eğlence sistemleri, bağlı hizmetler ve otonom sürüş özellikleri nedeniyle önemli ölçüde daha fazla sayıda EKÜ içermektedir. Tüm bu gelişmelerle birlikte, Geleneksel(legacy) Mimari ile başlayan araç mimarileri, Bölgesel Mimari'nin ortaya çıkmasına yol açmıştır. Geleneksel Mimari, her bir fonksiyon için ayrı bir EKÜ tahsis ettiğinden dolayı karmaşıklığın artmasına ve yönetimin zorlaşmasına neden olur. Donanım ve yazılım entegrasyonunu optimize etmek için ise Alan ve Bölgesel Mimari geliştirilmiştir. Geleneksel Mimari, birçok bağımsız EKÜ içerdiğinden, artan kablolama ağırlığı, yüksek üretim maliyetleri ve karmaşık bakım gibi dezavantajları beraberinde getirmiştir. Alan Mimari, benzer işlevlere sahip EKÜ'leri gruplayarak kablolamayı azaltırken, Bölgesel Mimari kablolamayı daha da minimize ederek maliyetleri ve ağırlığı düşürmektedir.

2. Geleneksel E/E Mimarisi

Araçtaki EKÜ'ler araç üzerinde farklı noktalarda bulunup herbiri belirli alt sistem ve ilgili fonksiyonlardan sorumludur. EKÜ'ler arasında bilgi aktarımı için CAN ve LIN gibi haberleşme ağları ile sağlanarak akış tamamlanır [1]. EKÜ'ler arası fiziksel bağlantının doğrusal olması ve düzenli bir kablo ağının olmaması araçtaki kablo ağının artmasına neden olarak kablo ağının araçtaki en ağır komponentlerden olmasına neden olmuştur. Araçlara eklenen ADAS ve bilgi eğlence sistemlerinin fonksiyonlarının artmasıyla birlikte haberleşme ağı ve kablo hattı da giderek karmaşık ve kontrolü zor hale gelmiştir. Geleneksel mimarinin getirdiği bazı temel zorluklar öne çıkmıştır. Kontrolün ve haberleşmenin zorlaşmasıyla birlikte EKÜ'ler arasında veri akışının sağlanamaması veri iletiminde

gecikmelere ve haberleşme ağı trafiğine neden olarak farklı hatalara sebep olmuştur. Aynı zamanda yeni fonksiyonların eklenmesinin zorlaşması başlıca sorunlardandır. Kablo ağırlığının artması, yönetimin zorlaşması elektrikli araçlarda menzil ve enerji verimliliğini düşürerek önemli bir problem haline gelmiştir. Yeni nesil araçlarda regülasyon ve homologasyon gereksinimleri olarak eklenmesi beklenen özelliklerin bu mimaride tanımlanması ve geliştirilmesi de maliyet ve araç entegrasyonu zorluklarını beraberinde getirir. Bu dezavantajlar nedeniyle, otomotiv üreticileri daha merkezi ve verimli çözümler geliştirmeye yönelmiştir. Fonksiyonel Mimari ve Bölgesel Mimari, Geleneksel Mimari'nin getirdiği yüksek hacimli kablolama, karmaşıklık ve maliyet sorunlarına karşı çözüm olarak geliştirilmiştir.

Özetle, Geleneksel Elektrik Elektronik(E/E) Mimari Görsel 1'de verildiği üzere, geçmişte elektronik sistemlerin araçlara entegre edilmesini sağlayan temel bir yapı olmasına rağmen, modern araçlardaki yüksek işlem gücü ve iletişim gereksinimlerine artık gerekli cevap verememekte ve eklenen fonksiyonların doğru bir şekilde çalışmasına olanak sağlayamamaktadır. Bu nedenle, merkezi ve bölgesel kontrollü mimarilere geçiş, otomotiv sektörünün gelecekteki en önemli dönüşümlerinden biri olarak öne çıkmaktadır.



Görsel 1: Geleneksel E&E Mimarisi

3. Fonksiyon Bazlı (Domain) E/E Mimarisi

Fonksiyon (domain) mimarisi araç üzerindeki elektronik kontrol ünitelerinin fonksiyonelliğe ve hitap ettiği alana göre bölümlere ayrılarak yönetilmesini sağlayan mimaridir. İşlevleri belirli alanlarda örneğin: ADAS, bilgi eğlence, powertrain (güç aktarımı) gibi alanlarda merkezileştiren bir tasarım yöntemidir. Alan mimarisi geleneksel mimarinin aksine kablo ağırlığını azaltarak maliyeti azaltıp verimliliği arttırmıştır. [Kaynak: Bosch, Vector, CS Selectronics], [12]

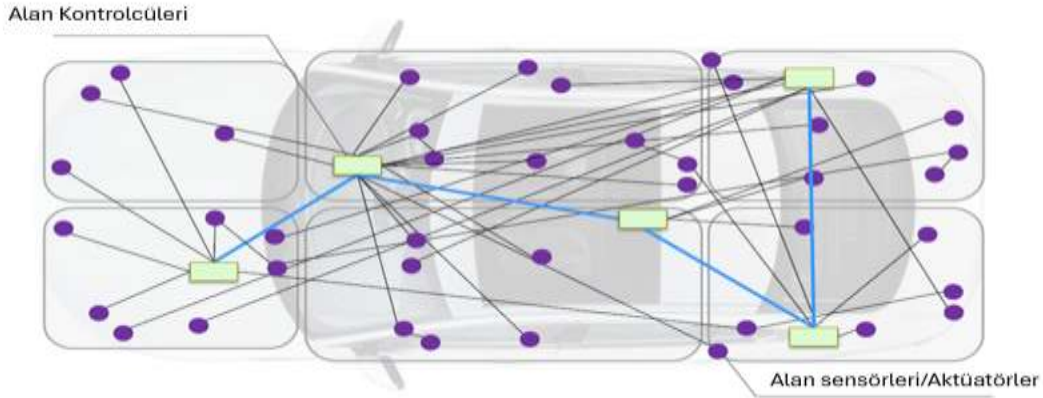
Görsel 2'de gösterilen Fonksiyonel E/E mimarisinde kullanılan alanların yapısını inceleyecek olursak;

- Güç Aktarma Organı (Powertrain) Alanı: Motor kontrolü, batarya yönetimi, şanzıman sistemleri gibi güç aktarımıyla ilgili sistemleri barındırır.
- Güvenlik ve ADAS Alanı: Otonom sürüş, çarpışma önleme sistemleri, şerit takip sistemleri gibi güvenlik fonksiyonlarını kapsar.
- Şasi ve Araç Dinamiği Alanı: Direksiyon, süspansiyon, fren sistemleri gibi mekanik kontrol sistemlerini içerir.
- Bilgi-Eğlence ve Konfor Alanı: Klima, medya sistemleri, gösterge paneli gibi kullanıcı deneyimini geliştiren sistemleri yönetir.

AVANTAJLAR	ZORLUKLAR
Daha Az Kablo: ECU'lerin önceden gruplanmış belirli alanlara ayrılması, kablo ihtiyacını azaltarak hem ağırlık hem de maliyet avantajı sağlar.	Farklı fonksiyonlar arasında Veri Paylaşımı: Gruplara ayrılmış her alan kendi içinde optimize edildiği için, farklı alanlar arasında hızlı ve güvenli veri paylaşımı gereklidir.
Gelişmiş Sistem Entegrasyonu: Aynı fonksiyon içindeki sistemler daha hızlı ve verimli bir şekilde iletişim kurar.	İleri Düzey İşlem Gücü Gereksinimi: Fonksiyon bazlı sistemlerin karmaşık işlemleri verimli bir şekilde yürütebilmesi için güçlü merkezi kontrol üniteleri gereklidir.
Yazılım Güncellemeleri ve Yönetim Kolaylığı: Merkezi kontrol, yazılım güncellemelerinin daha kolay uygulanmasını sağlar.	
Güvenlik ve Siber Güvenlik İyileştirmeleri: Alan bazlı sistemler, güvenlik önlemlerinin merkezi olarak yönetilmesine olanak tanır.	

Tablo –1-

E&E Mimarisinin Evrimi – Alan Mimari

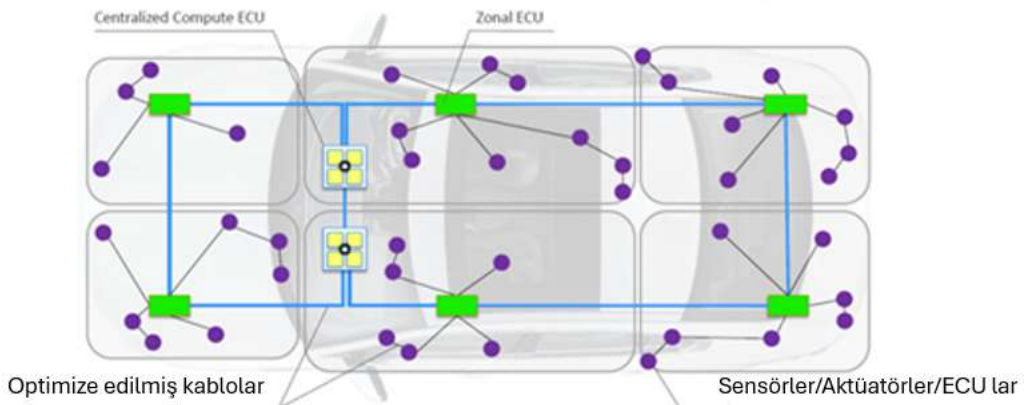


-Görsel 2-

4. Bölgesel Elektrik/Elektronik (E/E) Mimari

Otomotiv endüstrisi çalışmalarını geleneksel elektronik araç mimarisi, Fonksiyon bazlı elektronik mimarilerinin ardından daha otonom ve elektrikli araçlara yöneltmiştir. Bununla birlikte fonksiyonellik, performans, maliyet ve ölçeklenebilirlik noktalarında yeni talepleri karşılamak için çalışmalar bölgesel elektronik mimarisine kaydırılmıştır. Bu bölümde bölgesel elektronik mimarisi incelenecektir.

E&E Mimarisinin Evrimi – Bölgesel Mimari



-Görsel 3-

Araç üzerinde bölgesel mimarinin açıklanması:

- Bölgesel Kontrol Üniteleri (ZCUs): Araç üzerinde Ön sol, Ön sağ, Arka sol ve Arka sağ olmak üzere çeşitli bölümleri kontrol edebilen bölgesel kontrol üniteleri bulunur. Tüm bu kontrol üniteleri ana kontrol ünitesine bağlanır.
- Haberleşme Ağ Topolojisi: Bölge içi yönetim ve bölgeler arası iletişim için LIN, CAN, Ethernet ağların bir kombinasyonu kullanılır.

Geleneksel mimarilerin yanı sıra bölgesel mimariler, otomotiv endüstrisinde otonom sürüş ve bilgi eğlence sistemlerindeki verimliliği artırıp karmaşıklığı azaltarak yeni teknolojilerin getirmiş olduğu sorunlara yenilikçi bir çözüm sunmaktadır. Bölgesel mimari dışındaki mimarilerde her bir elektronik kontrol ünitesi belirli bir fonksiyon için bağımsız olarak çalışır. Kablo ağı daha geniştir. Bölgesel mimari yaklaşımıyla birlikte bölgesel kontrol üniteleri ile daha az elektronik kontrol ünitesi kullanımı, daha az kablo gibi faktörlerle sistemi sadeleştirip ölçeklenebilirlik açısından büyük avantajlar sağlamıştır. Diğer mimarilere göre yeni gelişmelere daha açık, daha kolay entegre edilebilir bir mimaridir. Dolayısıyla, yeni teknolojilerin geliştirilmesi ve değişen trendlere hızlı bir şekilde yanıt verilmesinde büyük bir avantaj sunar. Diğer mimarilerde farklı alanlar arasında haberleşme gecikmeli olabilirken bu mimaride bölgesel yaklaşım ile yüksek hızlı ethernet ağları daha verimli ve hızlı haberleşme imkanı sunar. Aynı zamanda OTA (Over-the-Air) güncellemeleri ve siber güvenlik önlemleri sunarak güvenliği maksimize eder. Tüm bu durumlar ele alındığında, Bölgesel mimarinin gelecek trendlerinde kritik rol oynayacağı güçlü bir şekilde görülmektedir. Veri işleme kapasitesinin gelişmişliği, daha esnek yapı sunması otomotiv endüstrisinde en önemli yapı taşlarından biri olacağını göstermektedir.

Gelecek Perspektifi:

- Bölgesel Mimari'ye Geçiş: Kablolama karmaşıklığını azaltırken Bölgesel Mimari ile birleşerek daha optimize bir yapı oluşturacaktır.
- Yüksek Hızlı Ağlar ve Ethernet Kullanımı: CAN, LIN ve FlexRay gibi geleneksel iletişim protokollerinin yerini, daha yüksek veri hızına sahip Ethernet tabanlı ağlar alacaktır.
- Yazılım Tanımlı Araçlara (SDV) Uyum: Alan Mimarisi yazılım güncellemeleri ve uzaktan yönetim (OTA) için gerekli altyapıyı destekleyerek Software-Defined Vehicles (SDV) dönüşümünü hızlandıracaktır.

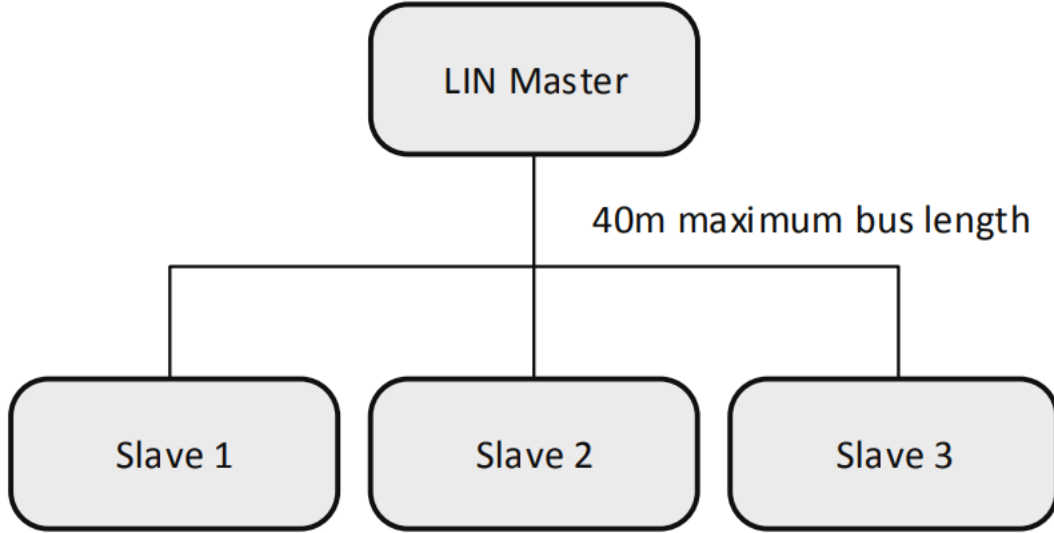
5. Otomotivde Elektronik Haberleşmesinin Evrimi

Otomotiv sektöründeki değişen regülasyonlar, müşteri beklentileri, yeni eklenen İleri Sürüş Destek sistemleri (ADAS), araç içi bilgi eğlence sistemleri araç mimarilerinin ve haberleşme protokollerinin evrimine neden olmuştur. Bu değişim farklı araç içi haberleşme protokollerinin kullanılmasını, geleneksel haberleşme protokollerinin veri taşıma kapasitesi ve hızının gelişmesini sağlamıştır. Elektronik kontrol ünitelerinin araç içerisindeki haberleşmesini sağlamak için yaygın olarak CAN

(Controller Area Network), LIN (Local Interconnect Network) ve FlexRay gibi protokoller kullanılmıştır. Ancak bu geleneksel yaklaşım, modern araçların giderek daha fazla elektrik kontrol ünitesi, sensör ve araç fonksiyonlarının içeriklerinin artmasıyla yetersiz kalmaya başlamıştır. Otonom sürüş ve ADAS bağlantılı teknolojilerdeki gelişmeler daha yüksek ve hızlı veri transferi ihtiyacını ortaya çıkarmış olup yeni bir iletişim alt yapısını zorunlu kılmıştır. Bu bölümde, geleneksel mimarilerde kullanılan LIN, CAN, CANFD gibi haberleşme ağları ele alınacak olup avantaj ve dezavantajları incelenecektir. Son olarak otomotiv sektörünün gelecekteki elektronik mimarisini şekillendiren Ethernet protokolünün detayları verilecektir.

5.1- Yerel Ara Bağlantı Ağı (LIN) LIN, otomotiv haberleşme protokolleri arasında sensörleri ve komponentleri birbirine bağlama noktasında düşük maliyetli çözüm olarak karşımıza çıkmaktadır. Görsel 4’de gösterildiği üzere LIN haberleşme protokolü LIN bir master (ana) ve bir veya birden fazla LIN slave (köle) içeren yapıya sahiptir LIN veri çerçevesi formatı detayları aşağıda gösterilmektedir.

5.1.1 Topoloji LIN master-slave ilişkisine dayanan bir bus topolojisidir. Tüm LIN düğümleri aynı fiziksel ortamı paylaşmakta olup bir ana düğüm ve maksimum 16 köle düğüme kadar oluşabilmektedir.



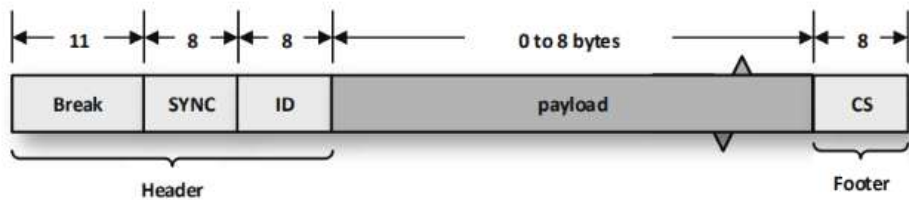
-Görsel 4-

5.1.2 Mesaj Yapısı

LIN mesajlarının yapısına baktığımızda, LIN haberleşmesi temel olarak mesajın başlangıcını belirleyen break (ara verme) ve slave ünitenin haberleşme senkronizasyonunu sağlayan "sync field" (senkronizasyon alanı) alanlarından oluşmaktadır.

Mesaj ID (kimlik) si 6 bitlik mesaj kimliği ve 2 bitlik parity (eşlik) den oluşmaktadır. Bu ID, belirli bir ünite adresi göstermek yerine mesaj adresini belirtmektedir.

Mesaj ID'sinin haberleşme ağında yayınlanmasından sonra, sadece bir slave düğüm mesaj yanıtına başlar. Yanıt, 1 ila 8 bayt veri ve 8 bitlik bir hata kontrol değeri içerir.



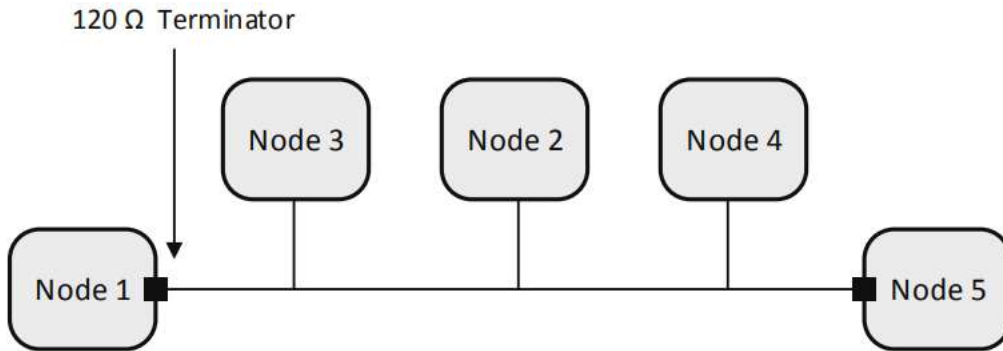
-Görsel 5-

5.2- CAN Haberleşmesi

Kontrol Alanı Ağı (CAN) veri yolu, elektronik kontrol ünitelerini birbirlerine bağlamak, araç içi haberleşmelerini sağlamak için kullanılan bir diğer seri veri yolu sistemidir. CAN haberleşme türü otomotiv ve endüstriyel sistemlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. CAN, birden fazla elektronik kontrol ünitesinin birbiriyle iletişim kurmasını sağlayan ortalama olarak uygun maliyetli ve dayanıklı bir ağ sunar. Bu sayede, elektronik kontrol üniteleri her bir elektronik kontrol ünitesi için ayrı ayrı analog ve dijital girişler yerine tek bir CAN arayüzüne sahip olabilir. Bu durum, otomobillerdeki toplam maliyeti, kablo karmaşasını ve ağırlığı azaltarak verimliliği artırır. Haberleşme hattı üzerinde bulunan her elektronik kontrol ünitesi CAN kontrolcüsüne sahiptir ve mesajlar ilgili üniteler tarafınca okunur. Her ünite mesajın kendisiyle ilgili olup olmadığını belirleyerek filtreleme yapabilir. Ağ topolojisi değiştirilmeden, ilave ünitelerin eklenmesi kolaydır. Her mesaj bir önceliğe sahiptir. Teorik olarak haberleşme ağı yönetimi aynı anda iki düğüm(node) mesaj göndermeye çalışırsa, daha yüksek önceliğe sahip olan mesajın haberleşme hattına yayın yapmasını ve diğer mesajın ertelenmesine dayanır.

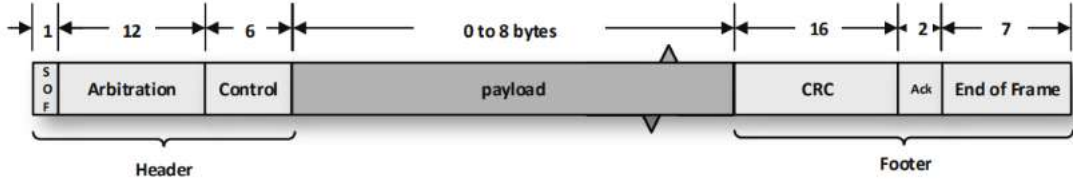
5.2.1 Topoloji

CAN, doğrusal veya çoklu bağlantı noktası olabilen bir veri yolu topolojisi etrafında tasarlanmıştır. Bu, CAN düğümlerinin aynı bükümlü çift bakır teller üzerinden birbirine fiziksel olarak bağlı olduğu anlamına gelir. Görsel 6'da gösterildiği gibi hatta 120 Ohm sonlandırma direnci kullanılır.



-Görsel 6-

5.2.2 Frame Format



-Görsel 7-

Sof : Çerçevenin başladığını gösteren 1 bitlik dominant sinyaldir.

Arbitration :12 bitten oluşur. İlk 11 bit Arbitration ID olarak adlandırılır. Mesajın önceliğini belirler.

Data : Mesajın veri yükünü taşır. Maksimum 8 byte veri taşır.

CRC :15 bitlik bir hata kontrol değeridir.Verici, bu değeri özel bir algoritma ile hesaplayıp çerçeveye ekler. Alıcılar bu değeri kontrol eder. Eğer uyumsuzluk varsa, hata var demektir.

ACK : Alıcılar, çerçevenin doğru ulaştığını vericiye bildirir. Hatalı bir alıcı varsa, ACK bitini baskılar ve tüm katılımcılara hata olduğunu bildirir.

End of Frame : 7 ardışık "recessive" bit, çerçevenin bittiğini gösterir.

5.3- Esnek Veri Hızlı CAN (CAN FD)

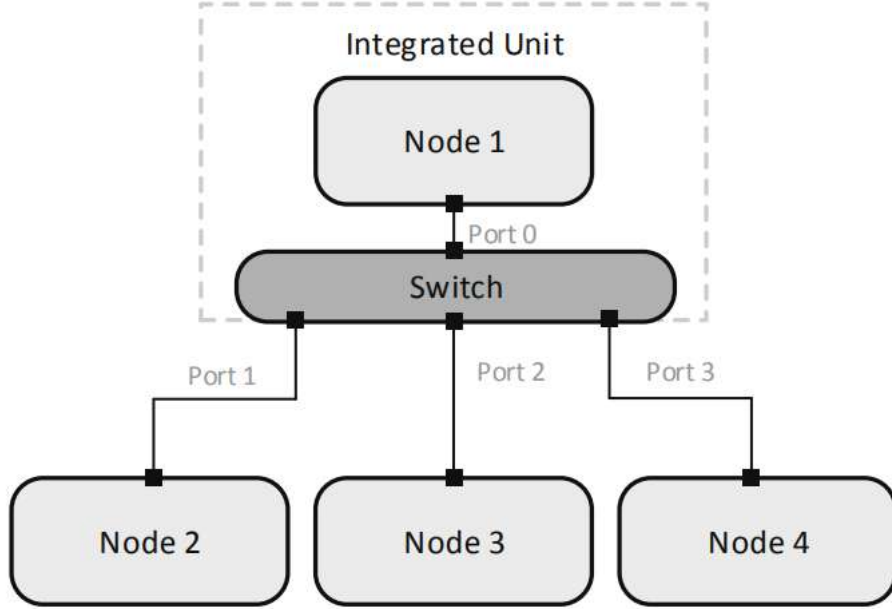
Geleneksel CAN haberleşme protokolünün bant genişliği 1 Mbit/s ile sınırlı kalmaktadır ve her çerçevede en fazla 8 bayt veri taşınabilir. CAN FD bu sınırlamaları genişleterek, daha yüksek bant genişliği ile 10Mbit/s'a kadar ve çerçeve başına 64 bayta kadar veri taşıma kapasitesi sunar. Müşteri, güvenlik ve yasal talepler yani regülasyonların artmasıyla birlikte elektrik kontrol ünitelerinin sayısı ve bunların ilettiği veri miktarı da artmakta olduğundan daha fazla verinin daha yüksek hızlarda iletilmesi ihtiyacı doğmuştur. CAN FD haberleşme protokolü, bu ihtiyacı karşılamakla birlikte, maliyeti de düşük tutar.

5.4 Otomotivde Ethernet Kullanımının Artışı

Ethernet otomotiv sektörü dışında yaygın olarak kullanılmasına rağmen son zamanlardaki otomotiv gelişmeleriyle birlikte otomotiv endüstrisinde daha fazla benimsenmeye başlanmıştır. Otomotiv Etherneti klasik Ethernetin araç gereksinimlerine uygun hale getirilmiş versiyonudur ve yüksek veri hızı, düşük gecikme ve güvenli veri iletimi gibi iyileştirmeler sunmaktadır.

5.4.1 Topoloji

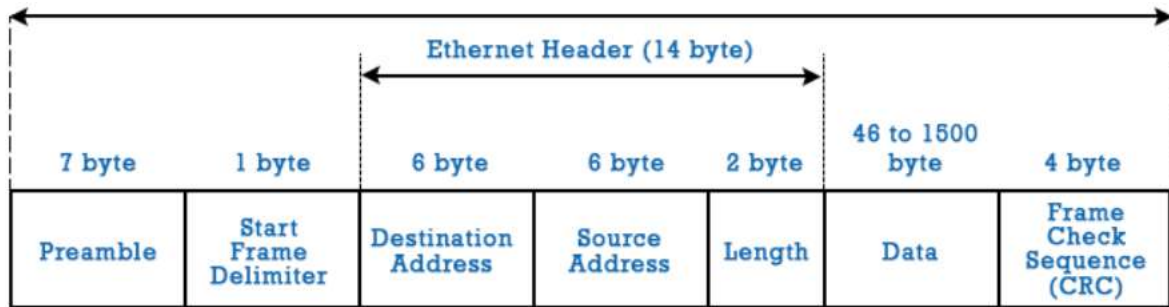
İki düğümden fazlasına sahip otomotiv Ethernet ağı, her bir üniteyi birbirine bağlamak için bir anahtara (switch, hub vb.) ihtiyaç duyar ve bunu Görsel 8'de gösterildiği üzere genellikle yıldız topolojini kullanarak yapar.



-Görsel 8-

5.4.2 Ethernet Mesaj Yapısı

Ethernet frame, ağdaki veri iletimini sağlamak için kullanılan temel yapı birimidir. OSI modelindeki veri bağlantı katmanında (Layer 2) işlev görür. Görsel 9’da Ethernet mesaj yapısı verilmiştir.



-Görsel 9-

Preamble = 7 byte'lık bir alandır. Bu 7 byte'lık dizi network ağına çerçevenin başlangıç ve bitiş sınırlarını tam olarak belirlenmesi için gönderilir.

SFD (Start Frame Delimiter) = 1 byte'lık bir dizidir. Mesajın başlangıcını belirlemektedir.

Destination Address = Hedef adresi belirtmektedir, ilk olarak fiziksel MAC adresi yazılır.

Source Address = Kaynak ünite adresine ayrılan bölümdür, 6 byte'lık alandan oluşur ve 48 bitlik kaynak fiziksel MAC adresi buraya yazılır.

Type (Length) = 2 byte'lık bir alandır.

Data = 46-1500 byte arasında "DATA" buraya gelmektedir. Mesaj'ın ne kadar büyük olacağına burada karar verilir. Bir frame en az 64 byte, en fazla 1500 byte veri taşıma kapasitesine sahiptir.

FCS (Frame Check Sequence) = 4 byte'lık bir bölümdür hata kontrolü gerçekleştirilir. Bu işlem gerçekleştirilirken "CRC" algoritması kullanılır.

Otomotiv Ethernet'inin Temel Avantajları:

1. Yüksek Bant Genişliği: Ethernet, 10 Mbps'ten başlayarak 100 Mbps, 1 Gbps ve hatta 10 Gbps hızlarına kadar hız desteği verebilir. Gelişmiş Sürücü Destek sistemleri ve Otonom Sürüş Sistemlerinde gereksinim duyulan fazla veriyi yüksek hızda iletme ihtiyacını karşılamaktadır.
2. Daha Az Kablo Kullanımı: Geleneksel haberleşme protokollerinde her EKÜ için ayrı kablo gereksinimi duyulurken, Ethernet tek bir fiziksel hat üzerinden birden fazla veri akışını (çift taraflı veri aktarımı ile) yönetebilir.
3. Düşük Gecikme Süresi: Gerçek zamanlı veri akışı gerektiren sistemler için düşük gecikme süresi sunarak, kritik güvenlik fonksiyonlarının daha verimli çalışmasını sağlar.
4. IP Tabanlı Haberleşme: OTA (Over-the-Air) güncellemeleri ve siber güvenlik çözümleriyle daha kolay entegrasyon sağlamasına olanak sunar.

5.5 Ethernet'in Otomotiv Elektronik Mimarisindeki Rolü ve Geleceği

Geleneksel E/E mimarileri, araç içinde EKÜ'lerin doğrudan birbiriyle iletişim kurduğu bir yapıdaydı. Ancak bu sistemin karmaşıklığı arttıkça, Domain Based Mimari (Fonksiyon Tabanlı Mimari) geliştirildi. Bu yapıda, fonksiyonlar belirli alanlara (güç aktarma, şasi, bilgi-eğlence, ADAS vb.) bölünerek daha merkezi bir kontrol sağlandı.

Günümüzde ise, Bölgesel E/E Mimari, bölgesel kontrol ünitelerinin ethernet tabanlı haberleşme ile hem kendi aralarında hemde ana kontrol ünitesi ile yüksek hızlı veri iletimini sağlayarak yazılım tanımlı araçlar için gerekli altyapıyı oluşturuyor. OTA ile uzaktan ünite yazılım değişiklikleri, gelişmiş sürücü

destek sistemleri, otonom sürüş sistemleri ve bilgi eğlence sistemleri Ethernetin entegre olduğu otomotiv sistemlerindendir.

Önümüzdeki yıllarda, Otomotiv Etherneti'nin yalnızca bölgesel mimari ile kısıtlı kalmayarak standart kullanılan bir haberleşme ağı haline gelmesi beklenmektedir. 5G ve 6G entegrasyonu ile birlikte araçlar, sadece iç sistemlerle değil, diğer araçlar ve çevre ile de sürekli iletişim halinde olacaktır. Dolayısıyla V2X (Vehicle-to-Everything) teknolojilerinin gelişimi Otomotivde Ethernet kullanımını arttırarak, yazılım tanımlı araçlar (Software-Defined Vehicles, SDV) konseptine yönelinmesini arttıracaktır.

Sonuç

Otomotiv sektöründe araç elektronik mimarisi sürekli olarak müşteri beklentileri, değişen ihtiyaçlar, yasal zorunluluklar gibi farklı sebeplerle gelişmektedir. Mimariye eklenen komponentlerin araç üzeri dizilimi, verimli kablo tasarım çalışmaları araç mimarilerinin gelişiminde önemli rol oynamaktadır. Bu değişimler araç içi ve dışı kullanılan haberleşme protokollerinde yenilikleri de beraberinde getirmiştir. Araç mimarisinin evrimi haberleşme ağlarının da evrimini getirmiş ve farklı mimarilerde farklı haberleşme ağı çözümleri ortaya konmuştur. Zonal mimari ile CAN-FD, Ethernetin gibi teknolojilerin yaygınlaşması, geleneksel haberleşme sistemlerinin sınırlamalarını aşarak daha yüksek bant genişliği, düşük gecikme süresi ile Otonom Sürüş, ADAS, Bilgi-eğlence sistemleri ve yazılım tanımlı araçlar için ideal bir çözüm oluşturmuştur. Bu evrim, yalnızca araç içi haberleşmesini değil, aynı zamanda araçların birbirleriyle ve çevreleriyle nasıl etkileşim kurduğunu da değiştirecektir. Bu noktada özellikle Otomotiv Ethernet teknolojisi, güvenlik ve çeşitli sebepler ile gelişen V2X teknolojisi için oldukça önemli bir altyapı sunmaktadır. Bu makalede, araç mimarisinin tarihsel gelişimi ve bu doğrultuda evrilen araç içi iletişim ağları sistematik olarak incelenmiştir. Farklı mimarilerin avantaj ve dezavantajları detaylı analizlerle karşılaştırılmıştır. Ayrıca, araç içi iletişim ağ yapıları bant genişliği gereksinimleri, gecikme toleransları ve entegrasyon kabiliyetleri açısından karşılaştırmalı analizler sunulmuş ve birbirleriyle kıyaslanarak kapsamlı bir değerlendirme verilmiştir.

REFERANSLAR

- 1-Evaluation and Design of Electric/Electronic-Architecture of the Electric Vehicle - Yang Zhao, Weiwen Deng and Jian Wu
- 2-Review of Electrical and Electronic Architecture for Autonomous Vehicles: Topologies, Networking and Simulators Wenwei Wang^{1,2} · Kaidi Guo¹ · Wanke Cao^{1,2} · Hailong Zhu^{3,4} · Jinrui Nan^{1,2} · Lei Yu⁵
- 3- ISO 11898 Road vehicles — Controller area network (CAN)
- 4- Automotive Ethernet The Definitive Guide – Charles M. Kozierok, Colt Correa, Robert B. Boatrigh, Jeffery Quesnelle

- 5- C.C. Chan, “The State of the Art of Electric and Hybrid Vehicles,” *Proc. of the IEEE*, Vol. 90, No. 2, pp. 247–275, Feb. 2002.
- 6- Y. Hori, “Future Vehicle Driven by Electricity and Control - Research on Four-Wheel-Motored: UOT Electric March II,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 51, No. 5, October 2004.
- 7- Jiang, S.: Vehicle E/E architecture and its adaptation to new technical trends. SAE Tech. Paper (2019)
- 8- Palanca, A., Evenchick, E., Maggi, F., et al.: A stealth, selective, link-layer denial-of-service attack against automotive networks. Paper presented at 14th International Conference, DIMVA 2017, Bonn, Germany, 6–7 July 2017
- 9- De La Torre, G., Rad, P., et al.: Driverless vehicle security: challenges and future research opportunities. *Future. Gener. Comp. Syst.* 108, 1092–1111 (2020)
- 10- Avatefipour, O., Malik, H.: State-of-the-art survey on in-vehicle network communication (CAN-Bus) security and vulnerabilities. arXiv: 1802.01725 (2018)
- 11- Blank, R.: How to save \$20 per car by optimization of the E/E system? *SAE Int. J. Passenger Cars Electron. Electr. Syst.* 8, 51–55
- 12- On Feedback-Based Rateless Codes for Data Collection in Vehicular Networks by Morteza Hashemi B.S., Sharif University of Technology, 2011 Submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy 2015
- 13- Total Phase, what is an Electronic Control Unit in Automotive Systems?
- 14- C.B. Jacobina, et al., “Reconfigurable Fault Tolerant Dual-Winding AC Motor Drive System,” *IEEE 36th Power Elect. Specialists Conf.*, 2005
- 15- C. C. Chan and K. T. Chau, *Modern Electric Vehicle Technology*, London, U.K. : Oxford Univ., 2001
- 16- C. C. Chan, “An overview of electric vehicle technology,” in *Proc. IEEE*, pp. 1202–1213, vol. 81, Sept. 1993
- 17- J. Fenton, *Handbook of Vehicle Design Analysis*, Warrendale, PA: Soc. Automotive Engineers, 1996
- 18- J. Beretta, “New tools for energy efficiency evaluation on hybrid system architecture,” *Proc. 17th Int. Electric Vehicle Symp.*, Oct. 2000
- 19- Zou Yuan. (2023) Study on the Technology Development of Multi-Domain Electrical and Electronic Architecture for Intelligent Networked Vehicles. *Automotive Engineering*, 45 (6): 895–909. doi: 10.19562/j.chinasae.qcgc.2023.06.001.

- 20- NA VALE V M, WILLIAMS K, LAGOSPIRIS A, (2015) (R) Evolution of E/E architectures. SAE Int. J. Passenger Cars-Electron. Elect. Syst., 8: 282–288. doi: 10.4271/2015-01-0196.
- 21- BANDUR V, SELIM G, PANTELIC V, (2021) Making the case for centralized automotive E/E architectures. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 70 (2): 1230–1245. <https://doi.org/10.1109/tvt.2021.3054934>.
- 22- Research on electrical/electronic architecture for connected vehicles Jian Wang; DianGe Yang; XiaoMin Lian IET International Conference on Intelligent and Connected Vehicles (ICV 2016)

Güvenlik Standartlarının Araç E&E Mimari Entegrasyonu

Vehicle E&E Architecture Integration of Safety Standards

Musa YILMAZ 1, İsmail GÜRBÜZ1

İsmail.gurbuz@tofas.com.tr, ORCID: 0009-0002-1578-4090

Musa.yilmaz@tofas.com.tr, ORCID:

1: Araştırma ve Geliştirme Direktörlüğü/Elektrik-Elektronik Sistemler Müdürlüğü/Elektrik & Elektronik Entegrasyon Yöneticiliği

Türk Otomobil Fabrikası Tofaş, BURSA, TÜRKİYE

Özet: Araç genel güvenlik düzenlemeleri, otomotiv ürünlerinin yaşam döngüsü boyunca güvenlik ve güvenilirliğini sağlamak amacıyla oluşturulmuştur. Bu düzenlemeler geniş kapsamlı standartlar ve gereklilikleri içermektedir. Böylelikle, üreticilerin araçlarını kamu kullanımına uygun ve hem ulusal hem de uluslararası normlarla uyumlu olmasını garanti altına almış olmaları açısından kritik öneme sahiptir. Özellikle GSR2 regülasyon kapsamında ilk fazda devreye giren ve ikinci fazda devreye girecek standartlarla birlikte, araç elektrik elektronik mimarisinin belirlenmesinde standartların önemi artmıştır. Bu sebeple bu çalışmada da güvenlik standartlarının araç elektrik elektronik mimarisine entegrasyonu konusu ele alınmış ve çeşitli elektronik fonksiyonlar örneklem olarak alınarak açıklanmıştır. Literatür araştırmalarında daha çok güvenlik standartların araç elektronik mimarisine doğrudan etkilerini açıklamak yerine bu standartların diyagnostik, iletişim ağı, fonksiyonel güvenlik gibi konular üzerine etkilerinin ayrı ayrı olarak ele alındığı gözlemlenmiştir. Bu çalışmada ise güvenlik standartlarının ve müşteri isterlerinin araç elektrik-elektronik mimarisi gelişim sürecine etkileri araştırılmıştır. Çalışmada, örnek olarak Acil Durum Frenleme Sistemi (AEBS) ve Alkol Kilidi Arayüzü fonksiyonları ele alınmış ve bu fonksiyonların genel çalışma mantığı açıklanmaya çalışılmıştır. Daha sonra, geliştirme sürecinde yer alan sistem gereksinimlerinin tanımlanması, araç içi ağ analizi, fonksiyonel güvenlik analizi gibi konulara yer verilmiştir. Bu araştırmaların sonucunda güvenlik standartlarının ve müşteri isterlerinin bir etkisi olarak araç elektrik elektronik mimarisinin ilgili durumlarda tamamen değiştirilmesi gerektiği veyahut çeşitli revizeler edilerek kullanılabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: GSR(Genel Güvenlik Regülasyonu),Araç Entegrasyon, Elektrik-Elektronik Mimari, Fonksiyonel analiz

Abstract: Vehicle general safety regulations encompass comprehensive standards and requirements established to ensure the safety and reliability of automotive products throughout their lifecycle. These regulations are critical in ensuring that manufacturers guarantee their vehicles are suitable for public

use and compliant with both national and international standards. With the standards that came into effect with GSR2 step1 and step2, the importance of standards in determining the electrical and electronic architecture of vehicles has increased. For this reason, this study addresses the integration of safety standards into the electrical and electronic architecture of vehicles and explains this using various electronic functions as examples. Literature reviews have observed that, rather than explaining the direct effects of safety standards on vehicle electronic architecture, the effects of these standards on topics such as diagnostics, networks, and functional safety have been addressed separately. This study investigates the effects of safety standards and customer requirements on the development process of vehicle electrical-electronic architecture. The study uses the functions of the Automatic Emergency Braking System (AEBS) and the Alcohol Lock Interface as examples and explains the general operating logic of these functions. Subsequently, topics such as system requirements specification, network analysis, and functional safety analysis, which are part of the development process, are presented. As a result of these investigations, it was concluded that, as an effect of safety standards and customer requirements, the vehicle's electrical-electronic architecture must be completely changed in relevant cases or can be used with various revisions.

Keywords: GSR (General Security Regulation), Vehicle Integration, Electrical-Electronic Architecture, Functional Analysis

1.GİRİŞ

Araç genel güvenlik düzenlemeleri, günümüz otomobillerinde elektronik mimarinin entegrasyonunda son derece önemli bir rol oynamakla birlikte, aynı zamanda araçların yaşam döngüsü boyunca güvenlik ile güvenilirliğini sağlamaktadır. Gelişen teknoloji ile birlikte araç elektronik sistemlerin entegrasyonu ile otomobiller giderek daha yönetilmesi karmaşık hâle geldikçe, bu düzenlemelere uyum sağlamak, elektriksel ve elektronik bileşenlerle ilişkili risklerin azaltılması açısından hayati önem taşımaktadır [1].

Tarihsel olarak, araç güvenliği düzenlemeleri toplumsal ihtiyaçlar ve teknolojik ilerlemeler doğrultusunda gelişmiştir. ABD’de Ulusal Karayolu Trafik Güvenliği İdaresi’nin (NHTSA) kurulması ve Birleşmiş Milletler Avrupa Ekonomik Komisyonu (UNECE) tarafından formüle edilen uluslararası anlaşmalar, standartlaştırılmış güvenlik önlemlerinin temellerini atmıştır. On yıllar içinde bu düzenleyici çerçeveler, emisyon standartları ve siber güvenlik de dâhil olmak üzere daha geniş bir yelpazeyi kapsayacak şekilde genişlemiş ve otomotiv sektörünün daha karmaşık elektronik sistemlere yönelimini arttırmıştır [2][3].

Bu güvenlik düzenlemelerinin otomotiv E&E mimarisine entegrasyonu, çeşitli zorlukları beraberinde getirmektedir. Üreticilerin yayınlanan katı standartlar ile uyumlu şekilde çalışan ürünler geliştirebilmesi gerekmektedir. Bu sistemler ile, tüketici güvenliği ve kamu güvenliğini sağlamak regülasyonun ana amaçlarından birisidir. Katı standartların yanı sıra araçların otonom seviyelerinin artmasına neden olan düzenlemelerle birlikte müşteri güvenliği odaklı sistemler artarmaktadır. Bu bağlamda, araç elektronik mimarileri de daha karışık bir hal almaktadır. Buna karşılık güvenlik standartlarının araç elektronik mimarisine entegrasyonu yalnızca olası arızalara karşı koruma sağlamakla kalmaz, aynı zamanda otomotiv sektöründe yeniliği de teşvik etmektedir.

Çalışmanın ana fikrini, Avrupa Parlamentosu ve Konseyi tarafından yayınlanan Genel Güvenlik Regülasyonu (General Safety Regulation GSR) kapsamında öne çıkan gerekliliklerin E&E sistem mimarisine etkisi oluşturmaktadır. GSR, genel olarak AB düzeyinde ve Türkiye’de motorlu kara taşıtlarının tip onayı ve piyasaya arz koşullarına ilişkin asgari güvenlik gereksinimlerini belirleyen bir regülasyondur [4]. GSR, sürücü, yolcu ve yayaların trafikteki güvenliğini artırmayı hedefleyen kapsamlı düzenlemeler sunmaktadır. Bu bağlamda, araç üreticilerinin bu düzenlemelere uygun çözümler geliştirmesini beklemektedir. Dolayısıyla, daha önce opsiyonel olarak sunulan bazı güvenlik fonksiyonları artık standart hale gelmiştir.

GSR resmî gazetede yayımlandıktan sonra GSR’ın uygulamaya giriş tarihinden itibaren regülasyona tabi ülkelerde GSR gerekliliklerine uygun bir şekilde araç satışı zorunlu hale gelmiş olur. Son yayınlanan GSR iki faz içermektedir; ilk etapta bunlardan faz 1 uygulamaya girmiştir, sonrasında ise faz 2’in devreye girmesi planlanmaktadır.

Bu bildiride de araç üretiminden satışına kadar geçen süreçte uyulması gereken GSR gereksinimlerinin, özellikle otomotiv elektrik-elektronik mimarisinin tasarım ve geliştirme sürecine olan etkileri üzerinde durulmuştur. Otomotiv sektöründe giderek artan yasal ve güvenlik temelli düzenlemeler, araç E&E sistem tasarımının yalnızca mühendislik bakış açısıyla değil, aynı zamanda mevzuat perspektifiyle de ele alınmasını zorunlu kılınmasına sebep olmuştur. Birinci GSR fazı itibarıyla zorunlu kılınan başlıca güvenlik fonksiyonları arasında yer alan Acil Durum Frenleme Sistemi (AEBS) ve Alkol Kilidi Arayüzü, fonksiyonları çalışmada örneklem olarak kullanılmıştır.

AEBS, öngörülmesi kolay olmayan trafik durumlarında öndeki araç ile çarpışma ya da yayaya çarpma riskini en aza indirmeyi amaçlarken; Alkol Kilidi Arayüzü, daha önce alkollü araç kullanan veya teşebbüs eden bireylerin araçlarına entegre edilir. Alkolmetre sayesinde, alkollü sürücünün araç motorunu çalıştırmasını engelleyerek trafikte alkollü araç kullanımının sebep olduğu olayları ortadan kaldırmayı hedeflemektedir. Bu fonksiyonların zorunlu hale gelmesi, elektronik kontrol üniteleri (EKÜ), sensör teknolojileri, yazılım geliştirme faaliyetleri ve araç mimarisi üzerinde doğrudan etkiler yaratmaktadır.

Sonuç olarak, regülasyonların yalnızca yasal bir zorunluluk olarak kalmamıştır. Otomotiv endüstrisinde özellikle E&E sistemler alanında geliştirme yapan birimlere etkisi azımsanamayacak dereceye ulaşmıştır. Dolayısıyla, mühendislik yaklaşımını şekillendiren ve teknolojik gelişimi yönlendiren temel bir unsur olduğu da görülmektedir. Araç üreticileri için bu süreç, güvenlik, kullanıcı deneyimi ve regülasyona uyum arasındaki dengeyi kurmayı gerektiren çok disiplinli bir mühendislik problemi haline gelmiştir.

Bu çalışmada regülasyonların araca entegrasyonu sürecinde; müşteri ister analizi, sistem gereksinimlerinin tanımlanması, araç ağ topolojisinin güncellenmesi, veri yolu yük analizinin yapılması, fonksiyonel güvenlik adımlarının tamamlanmasına kadar uzanan çok katmanlı bir yapı ele alınmıştır. Süreç boyunca kullanılan tasarım kriterleri ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Ayrıca, bu kriterlerin mühendislik karar mekanizmaları üzerindeki belirleyici rolü tartışılmıştır.

2. GENEL GÜVENLİK REGÜLASYONU ETKİLERİ VE FONKSİYONLARI

Genel güvenlik regülasyonu (GSR) Avrupa Parlamentosu ve Konseyi tarafından araç üreticilerinin ürettiği araçlarda uyması gerektiği asgari kuralları belirten bir regülasyondur. Bu regülasyon Avrupa Birliğine içerisinde yer alan ülkelerde ve diğer bazı ülkelerde satılacak araçlarda uygulanması zorunlu olan bir regülasyondur. GSR gereklilikleri ülkemizde, Avrupa Birliği ülkelerinde uygulandığı biçimi ile birebir aynı olacak şekilde devreye alınmaktadır. GSR gereklilikleri Avrupada ve ülkemizde resmi gazetede yayımlanmaktadır. GSR'nin temel amacı, kara yollarında güvenliği artırmak ve kazalardan kaynaklanan can kayıplarını en aza indirmektir. Bu doğrultuda düzenleme, çeşitli aktif ve pasif güvenlik donanımlarını tüm yeni araçlarda zorunlu hale getirmektedir. Bu sayede, yalnızca sürücülerin değil, aynı zamanda yayaların ve bisikletlilerin korunmasını hedeflemektedir. Özellikle şehir içi trafiğinde artan yaya ve bisikletli yoğunluğu dikkate alındığında, bu düzenlemenin kapsamı trafik güvenliği açısından önemli bir yere sahiptir.

GSR ile, daha önce çoğunlukla opsiyonel olarak sunulan birçok ileri seviye sürücü destek sistemi, artık standart donanım haline gelmiştir. GSR ile şerit takip asistanı, akıllı hız sınırı uyarısı, sürücü yorgunluk algılama sistemi ve gelişmiş acil frenleme sistemi (AEBS) gibi fonksiyonlar artık tüm yeni araçlarda standart hale gelmektedir. GSR kapsamında, devreye alınması gereken başlıca özellikler şunlardır: Akıllı Hız Yardım Sistemi (ISA), Geri Görüş Kamerası ve Arka Park Sensörleri, Sürücü Yorgunluk ve Dikkat Algılama Sistemi, Şerit Takip Sistemi, Acil Durum Frenleme Sistemi (AEBS), Lastik Basıncı İzleme Sistemi (TPMS) ve Alkol Kilidi Arayüzü. Belirtilen sistemler, sürücünün hata yapma riskini azaltır. Böylelikle, kaza oranlarının düşmesine ve olası kazalarda hasarın minimum seviyede olmasına katkı sunmaktadır.

Bununla birlikte, GSR yalnızca teknik gerekliliklerle sınırlı olmadığı görülmüştür. Ek olarak, otomotiv endüstrisinin Ar-Ge stratejilerini ve üretim süreçlerini yeniden şekillendiren bir etkisinin olduğu göz ardı edilmemelidir. Araç üreticileri ve tedarikçiler açısından GSR, yeni teknolojilerin uluslararası tip onay süreçleriyle uyumlu hale getirilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu bağlamda, regülasyon yalnızca trafik güvenliği bakımından değil, aynı zamanda teknolojik dönüşüm açısından da önemli bir yere sahiptir.

Sonuç olarak, Genel Güvenlik Regülasyonu (GSR), Avrupa Birliği'nin yol güvenliği vizyonu doğrultusunda öne çıkan bir gerekliliktir. Zorunlu hale getirilen güvenlik donanımları ile, otomotiv sektörünün daha güvenli, yenilikçi ve sürdürülebilir bir yapıya dönüşmesi hedeflenmektedir.

GSR gerekliliklerinden AEBS ve alkol kilidi özelliklerinin otomotiv elektronik sistemlerine entegrasyonu, düzenleyici çerçeveler ve teknolojik yenilikler tarafından yönlendirilen önemli bir güvenlik ilerlemesini temsil etmektedir. AEB sistemleri, sensörler ile kameraların, radar sistemlerinin veya lidar sistemlerinin birleşimini kullanarak olası tehlikeleri tespit eder ve çarpışmaları önlemek için otomatik olarak fren uygular. Araştırmalar, bu sistemin arkadan çarpma kazalarını %39'a kadar azaltabildiğini göstermektedir [5]. Diğer taraftan, alkol kilidi sistemleri aracın çalıştırılabilmesi için sürücünün alkol testi vermesini zorunlu kılar. Bu sayede, alkollü araç kullanımı sonucunda meydana gelen kazaların oranlarını %67'ye kadar düşürmektedir [6].

2.1 Acil Durum Frenleme Sistemi (AEBS – Automatic Emergency Braking System):

Gelişmiş acil frenleme sistemi, araçların acil frenleme sistemlerine ilişkin Avrupa yasalarına uyan güvenlik sistemidir. Sistem, öndeki sabit veya yavaş hareket eden araçlara tepki vermeyen sürücüyü uyararak dikkatini yola çekmeye çalışır. Sürücü yine de tepki vermezse, sistem motoru tork keserek yavaşlatmakta ve çarpışmayı önlemek veya hafifletmek için arabaya fren yaptırmaktadır.

Sistem, aracın ön tarafına yerleştirilen radar, lidar ve/veya kamera sensörleri vasıtasıyla yol ve önde seyreden araçları anlık olarak takip etmektedir. Yeni nesil radarlar, yüksek frekans aralıklarında çalışabilmektedir. Bu sayede gece ve gündüz koşullarında hassas algılama yetenekleri sayesinde nesne tespiti yapmaktadır. Günümüzde gelişmiş kameralar yüksek çözünürlükte görüntü algılama, işleme ve alınan verilerin minimum gecikme süreleriyle iletilmesi konusunda önemli gelişim kaydetmişlerdir. AEBS, kapsama alanındaki yolu, takip mesafesindeki araçların hız değişiklikleri ve sürücünün frenleme davranışları gibi faktörleri dikkate alan bir yazılım algoritması kullanır. Sistem, takip mesafesindeki aracın anlık hareketlerini izler ve beklenmedik hareketi algıladığında sürücüyü araç gösterge paneli üzerinden görsel ve duyuşal uyarılarla uyarır. AEBS, ilk etapta sürücünün dikkatini yola vermek için tasarlanmıştır. Sürücü belirtilen süre içinde müdahalede bulunmadığı takdirde, AEBS devreye girer ve fren kontrol ünitesi üzerinden periyodik olarak frenlemeye başlar. Bu sayede çarpışmayı önlemeye çalışır. AEBS, doğrudan frenleme işlevine müdahale edebildiği için geliştirme aşamasında fren kontrol ünitesi ile tamamen uyumlu geliştirilmek zorundadır. Sonuç olarak, AEBS'nin tasarımı ve entegrasyonu sırasında sensör, kamera, radar ve EKÜ bileşenleri aracın diğer EKÜ'leri ile hata olmadan kesintisiz bir iletişim sağlamalıdır. Kir, buzlanma, kar gibi çevresel faktörler kamera ve radar performansını önemli ölçüde etkiler ve düşürebilmektedir. [7]. Kamera kullanılan sistemlerde güneş ışığının veya başka bir ışık kaynağının kamera üzerine doğrudan gelmesiyle birlikte AEBS 'in performansı azalabilmektedir.

İncelemeler, AEBS'nin araçların arkadan çarpışmaları yaklaşık olarak %50, araç ile yayaya çarpmaları ise %30 oranında azaltabildiğini göstermektedir [8]. Şekil 1'de AEBS fonksiyonunun çalışma mantığı açıklanmıştır.



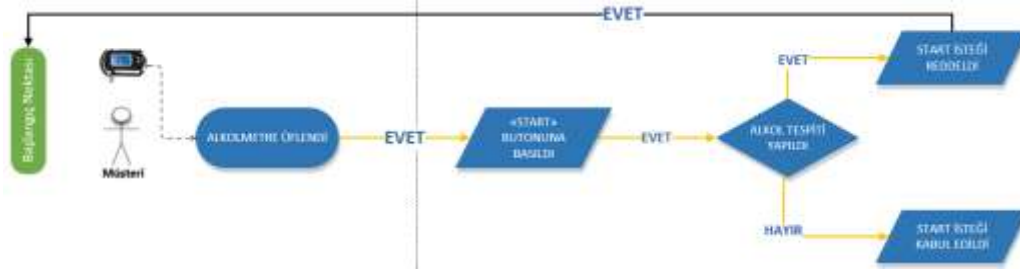
Şekil 1 AEBS Fonksiyonu Algoritması

2.2 Alkol Kilidi Arayüzü:

Alkolmetre cihazı araca bağlandıktan ve diyagnostik komut ile aktif hale getirildikten sonra kullanıma hazır hale gelir. Alkol kilidi arayüzü fonksiyonu aracın motorunun çalıştırılabilmesi için sürücünün alkolmetre cihazına üflemesini zorunlu kılmaktadır. Alkol kilidi sisteminin merkezinde yer alan alkolmetre cihazı, sürücünün verdiği nefes örneğini analiz ederek kandaki alkol seviyesini ölçmektedir. Ölçülen ve analiz edilen değere istinaden gövde kontrol modülüne bir değer atanır. Atanan değer yasal sınırın altında ise çalıştırma isteğine onay verir. Fakat, sınırın üzerinde bir değer atanırsa gövde kontrol modülü (BCM) çalıştırma isteğine onay vermez ve diyagnostik hata kodu (DTC) kaydeder.

Bu doğrultuda, alkolmetre cihazının Gövde Kontrol Modülü (BCM) üzerine entegre edilebilmesine olanak sağlayacak uygun bir donanım arayüz yapısına ve gerekli yazılım desteğine ihtiyaç duymaktadır. Gövde kontrol modülünün (BCM) diyagnostik kabiliyeti sayesinde geçmişteki alkollü araç çalıştırma denemeleri diyagnostik hata kodları (DTC) okunabilmekte ve kaydedilebilmektedir.

Sonuç olarak alkol kilidi sistemi; sistem elektrik donanım, yazılım ve diyagnostik entegrasyonu gerektiren bir özelliktir. Güvenli sürüş sağlayan ve regülasyonlar ile uyumluluk içerisinde olan önemli bir GSR fonksiyonudur. Şekil 2’de alkol kilidi fonksiyonunun çalışma algoritması verilmiştir.



Şekil 2 Alkol Kilidi Fonksiyonu Algoritması

3. GENEL GÜVENLİK REGÜLASYONUNUN VE MÜŞTERİ İSTERLERİNİN ARAÇ E&E MİMARİSİNE UYGULANMASI

Araç elektrik ve elektronik sistemlerinde güvenlik düzenlemelerinin uygulanması, Orijinal Ekipman Üreticilerinin (OEM) araç E&E mimari geliştirme süreçlerinde önemli etkileri bulunmaktadır. Günümüz araçlarının elektronik sistem gereksinimlerinin artmasıyla birlikte, birçok yeni Elektronik Kontrol Ünitesi (EKÜ) araç E&E mimarisine dahil olmaya başlamıştır. Bu yeni EKÜ'lerin sisteme entegrasyonu ve güvenlik standartlara uyumu gerekmektedir. Bu bağlamda otomotiv sektörü, gelişmiş sürücü destek sistemlerinin (ADAS) gelişmesi ile giderek daha karmaşık entegrasyon süreciyle karşı karşıya kalmıştır. Geliştiricilerden beklenti, sorunsuz sistem tasarımı yapmaktır. Olası problem anında devreye girecek ve sistemin çalışmasını devam ettirecek güvenlik mekanizmasına sahip olmak gerekmektedir. Bu bağlamda fonksiyonel güvenlik ISO26262 referans alınmaktadır. Günümüzde, genel güvenlik regülasyonu (GSR)'ın zorunlu olması ile GSR gerekliliklerine sahip ortalama bir araç, yaklaşık 20 tane EKÜ, çeşitli sensörler ve birçok yazılım algoritması ve bahsi geçen birçok yenilik içermektedir [9].

Regülasyon isterleri, araç üzerinde uygulanmadan önce kapsamlı bir uygunluk analizi gerektirir. Var olan aracın mevcut E&E mimarisinin istenilen fonksiyonu destekleyip destekleyemeyeceği üzerinde durulur. Bu analiz sonucunda, araç E&E mimarisi ile ilgili yapılacak değişiklikler saptanır. Özetle, yeni fonksiyonların mevcut sistemlerin çalışmasını nasıl etkilediği ve E&E mimariye entegrasyonu esnasında ortaya çıkabilecek problemler önceden analiz edilmelidir. Bu çok boyutlu değerlendirme sürecinde, E&E sistem gereksinimleri geliştirme fazında önemli tasarım girdisi olan Müşteri Fonksiyonel İsterleri (Customer Functional Requirements – CFRs) tanımlanır. CFR'ler, hem regülasyona tam uyumu garanti eden hem de müşteri odaklı bir geliştirme yaklaşımı sağlayan önemli referans dökümanlardır.

3.1 Müşteri İsterleri Analizi :

Müşteri Fonksiyonel İsterleri (Customer Functional Requirements – CFR), yeni geliştirilen bir araç fonksiyonunun kullanıcı bakış açısından nasıl çalışması gerektiğini açıklayan dökümanlardır. CFR'ler

teknik ayrıntılardan arındırılmış, anlaşılır ve sistematik bir şekilde hazırlanır [10]. Bu dokümanlar, yalnızca ilgili fonksiyonun kendisine odaklanmakla kalmaz; aynı zamanda söz konusu fonksiyonun araç içerisindeki diğer alt sistemler üzerindeki doğrudan veya dolaylı etkilerini de göz önünde bulundurur. Bu nedenle, CFR dokümanları çoğunlukla öngörülen etki alanlarına göre yapılandırılır ve alt sistem bazlı başlıklar altında düzenlenir.

Örneğin, Acil Durum Frenleme Sistemi (AEBS), kamera ve radar gibi ileri sürücü destek sistemleri (ADAS) bileşenlerine dayanır; buna rağmen işlevselliği doğrudan fren sistemleri üzerinde etkisini gösterir [11]. Bu kapsamda tanımlanan temel tasarım parametreleri;

A) Kullanıcı bakış açısıyla tanımlanmış operasyonel durumlar: Fonksiyonun farklı kullanım durumlarında (örneğin şehir içi, otoyol, değişken hız ve hava durumu) nasıl davranması gerektiği kullanıcı bakış açısıyla ifade edilir.

B) Hata Durumları ve eşik değerleri: Fonksiyonun sensör arızası, iletişim kesintisi veya kısa devre durumlarında nasıl davranılması gerektiği tanımlanır. Örneğin, AEBS'in görüntü aktarımı, iletişim veya kamera problemleri esnasında kullanıcının güvenliğini tehlikeye atmadan fonksiyonun ne seviyede çalışmaya devam edeceği tanımlanır.

C) Kullanıcı Deneyimi ve HMI Etkileşimi: Kullanıcıyı uyarmanın gerektiği tüm koşulların tanımlandığı bölümdür. Uyarı biçimleri görsel (şekil, renk, görünürlük süresi), işitsel (ses seviyesi ve periyodu) ve dokunsal (titreşim ve periyodu) açıkça belirtilir. Bu uyarılar fonksiyonun önem ve güvenlik seviyesine göre değişkenlik gösterebilir.

D) Alt Sistem Etkileşimleri: CFR, yalnızca ilgili EKÜ için gereksinim tanımlamakla kalmayıp, etkileşimde bulunduğu diğer EKÜ'lerin de ilgili fonksiyona ilişkin gereksinimlerine sahiptir. Örneğin, AEB sisteminde kamera görüntü kaydedip aktarım yaparken, fren kontrol ünitesi frenleme yaparken diğer yandan motor kontrol ünitesi de tork sınırlandırması yapmaktadır. CFR motor kontrol ünitesine ait gereksinimlere de sahiptir.

E) Regülasyon ve Standartlarla Uyum: Çeşitli girdilerden (müşteri beklentileri, hata durum senaryoları, operasyonel durumlar) beslenerek tanımlanan CFR'lerin hali hazırda var olan regülasyonları ve/veya homologasyon isterlerini etkilememesi gerekir. Bu sayede, diğer regülasyon ve standartlarla uyum içerisinde tanımlanmış olurlar [12].

F) Müşteri Beklentileri ve Pazar Farklılıkları: Araç satışının planlandığı marketlere uygun müşteri beklentileri ve ilgili bölgeye spesifik regülasyonları garanti altına alacak ve uyum içerisinde olacak şekilde hazırlanır.

Şekil 3’ de genel olarak otomotiv elektrik-elektronik geliştirme süreci aktarılmıştır.



Şekil 3 Genel Otomotiv Elektrik-Elektronik Geliştirme Süreci [13]

3.2 Sistem ve Fonksiyonel Tasarım:

Sistem ve fonksiyonel tasarım, otomotiv E/E (Elektrik ve Elektronik) mimarilerinde kritik bir aşamadır. Bu süreç, müşteri fonksiyonel isteklerinin (CFR) sistem gereksinimlerine dönüştürülmesini ve tüm araç alt sistemleri ile uyumlu olacak şekilde entegrasyonunu kapsar. Sistem tasarımında amaç, fonksiyonel gereksinimlerin teknik, lojik ve donanımsal boyutlarının net bir şekilde belirlenmesi ve bu gereksinimlerin araç içi tüm alt sistemlerle tutarlı bir şekilde çalışmasını sağlamaktır [12]. Fonksiyonel tasarım süreci dört adımda incelenecektir. Bu adımlar; sistem gereksinimlerinin tanımlanması, ekü ve ağ yapısının belirlenmesi, diyagnostik (hata yönetimi), fonksiyonel güvenlik yönetimi.

3.2.1 Sistem Gereksinimlerinin Tasarlanması:

Sistem gereksinim tanımlama süreci, bir otomotiv projesinin başarısı açısından kritik bir aşamadır. Bu süreçte, sistemden beklentiler net bir şekilde belirlenmeli, sistemin hangi koşullar altında nasıl davranacağı ve hangi tepkileri vereceği ayrıntılı biçimde tanımlanmalıdır [14].

Müşteri Fonksiyonel İsterleri (CFR) doğrultusunda, sistem geliştirmesine başlamadan önce tüm etkiler analiz edilmiş ve öngörülmüş olmalıdır. Sistem gereksinimleri tanımlandıktan sonra, bu gereksinimler teknik ve lojik boyutlara dönüştürülürken sistemin girdileri ve çıktıları detaylı bir şekilde incelenir. Özellikle kullanılacak Elektronik Kontrol Ünitesi (EKÜ) belirlenir ve diğer EKÜ'larla olan ilişkisi incelenerek en uygun haberleşme yöntemi seçilir. Bu kapsamda CAN, LIN veya Ethernet tabanlı sinyal tasarımlarına başlanır ve uygun birimler arasında iletişim sağlanır [15].

Örneğin, AEBS fonksiyonunda, AEB ünitesi ile Fren Kontrol Ünitesi (BSM) arasındaki veri iletişimi CAN protokolü destekli sinyaller aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Ardından, fonksiyonel, diyagnostik ve güvenlik gereksinimleri belirlenir ve sistem tasarım dokümanlarına dahil edilir.

Günümüzde otomotiv endüstrisinde gereksinim tanımlamaları genellikle metin tabanlı veya model tabanlı yöntemlerle yapılmaktadır. Gereksinimlerin yazımı sırasında aşağıdaki kurallara uyulması kritik öneme sahiptir:

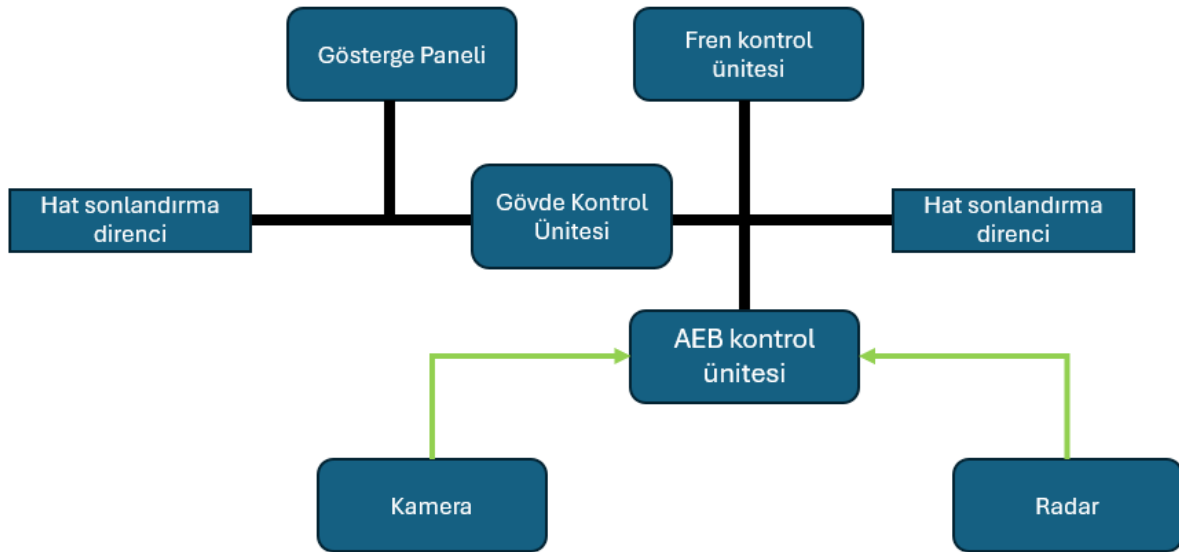
- a) Gereksinim ifadelerinin nesnel ve doğrulanabilir olması,
- b) Sistem davranışının hangi koşullar altında hangi işlevi yerine getireceğinin yoruma açık olmaması,
- c) Gereksinimlerin izlenebilir, açık ve çelişkisiz olması [10][15].

Bu doğrultuda, sektörde yaygın olarak kullanılan araçlar arasında IBM DOORS, Polarion, Jama Connect ve Enterprise Architect bulunmaktadır. Sistem testleri ve araç üzeri validasyon süreçlerinde, bu dokümanlar ana referans kaynak olarak kullanılmaktadır.

3.2.2 Ekü ve Ağ Yapısının Belirlenmesi:

Aracın ekü ve ağ yapısı belirlenirken öncelikle araçtaki ilgili fonksiyonlar tespit edilir. Fonksiyonların çalışacağı EKÜ'ler tespit edilir ve bu EKÜ'ler arasındaki en verimli haberleşme yöntemi seçilir. CAN, LIN veya Ethernet tabanlı protokoller üzerinden veri iletimi planlanır. Burada protokol seçimi yaparken ilgili fonksiyonun sistem gereksinimleri okunur ve özelliğin hangi koşullarda ne kadar süre içerisinde gerçekleşmesi gerektiği ve de gönderilecek verinin boyutu ve türü tespit edilir. Örneğin, GSR kapsamında zorunlu AEBS fonksiyonunun yönetilmesi, Kamera ünitesi ile Fren Kontrol Ünitesi (BSM) arasındaki CAN veya CANFD gibi güvenilir bir protokol sayesinde olmaktadır. Haberleşme ağı seçiminde maliyet, sistem gereksinimleri ve veri boyutları göz önüne alınır. Burada fonksiyonlara ilişkin EKÜ ve ağ yapıları belirlendikten sonra, ilgili ağ yapısına ilişkin uygun topoloji biçimi seçilmeli ve bu ağ yapısının kullanımı detaylandırılmalıdır. Örneğin CAN protokolünün kullanıldığı bir araçta, CAN hattındaki hat yoğunlukları hesaplanmalı ona göre araçtaki CAN hatlarının veri iletim hızları ve sayıları belirlenmelidir.

Hat yoğunluğu analizinin yapılmasına özellikle yeni EKÜ ile araç E&E mimarisine eklenen sinyaller sonucunda karar verilir. Bu analiz kapsamında, veri yolunun mevcut yükü değerlendirilir ve ağ yoğunluğu yüzdelik değerler şeklinde nicel olarak ortaya konulur. Böylece, veri yolu kapasitesinin mevcut sistem yükü altında yeterliliği anlaşılır ve olası darboğaz veya iletişim gecikmeleri önceden tespit edilerek gerekli optimizasyon veya önlem stratejileri geliştirilebilir.



Şekil 4 Genel Araç Ağ yapısı ve Ekü bağlantısı

3.2.3 Diyagnostik (Hata Yönetimi):

Sistem tasarımı yalnızca fonksiyonun normal çalışma koşullarını değil, aynı zamanda olağan dışı durumları da kapsamalıdır. Sensör arızası, iletişim kesintisi, enerji kaybı gibi durumlarda sistemin nasıl davranacağı önceden tanımlanmalı ve kullanıcı güvenliğini riske atmadan aracı güvenli moda geçirmelidir. Araç içerisindeki mesajlardaki kayıpların olduğu durumda araçtaki fonksiyonların nasıl çalışacağı, gerekli durumda aracın hangi indikasyonları yakması gerektiği saptanmalıdır. Alınan hataya ilişkin ilgili hata kodları (DTC) oluşturulmalıdır. Bu hata kodlarının hangi koşullarda ortaya çıktığı, hatanın olduğu durumdaki aracın davranışı ve de bu hatanın nasıl çözümlenebileceği detaylı bir şekilde açıklanmalıdır. Araç üzerindeki gerekli EKÜ'ler gerekli diyagnostik yeterliliğe sahip olmalıdır ve bu ünitelere, OBD-II üzerinden bağlanılarak hata tespiti ve arıza kodları aracılığıyla bakım süreçlerine destek sağlanılmalıdır.

Diyagnostik işlemleri için geliştirilmiş farklı protokoller bulunmaktadır. Başlıcaları şöyledir;

- a) UDS (ISO 14229)
- b) OBD (ISO 15031)
- c) SAE J1939
- d) KWP2000 CAN
- e) KWP2000 K-Line
- f) DoIP ISO 13400
- g) WWH-OBD ISO 27145KWP2000

Otomotivde genelde diagnostik protokolü olarak UDS kullanılmaktadır. UDS (Unified Diagnostic Service) protokolü KWP2000, K-Line ve KWP2000 CAN protokolleri temel alınarak, yeni ihtiyaçları karşılamak, önceki uygulamaları standart haline getirmek ve tek geçerli diyagnostik protokolü olması için geliştirilmiştir. UDS protokolü OSI (Open Systems Interconnection) katman yapısının 7. basamağını tanımlar. ISO 15765-2 normu ile tanımlanan KWP2000 CAN protokolünün geliştirilmiş halidir.

UDS protokolü karayolu taşıtlarında kullanılmak üzere otomotiv diyagnostik servislerinin data-link bağımsız gereksinimlerini tanımlar. ISO 14229-1:2013 normu üzerine oluşturulmuştur ve araç içinde

kullanılan elektronik kontrol ünitelerinin kontrol fonksiyonları üzerinde diyagnostik işlem yapılmasına olanak sağlar. CAN ağı üzerinden gerçekleştirilen diyagnostik haberleşme ISO 15765-3 ve ISO 14229-3 normları ile belirlenmiştir.

3.2.4 Fonksiyonel Güvenlik ve Hata Yönetimi:

Elektrik ve Elektronik (E/E) bileşenler ile çevresel algılayıcı kameralar, günümüz araçlarında sürücü destek sistemleri (ADAS) ve otonom sürüş teknolojilerinin temel yapıtaşını oluşturmaktadır. Bu donanımların güvenli bir şekilde çalışması, yalnızca normal koşullar altında değil; aynı zamanda arıza veya sistemik hata durumlarında da zorunludur.

Bu bağlamda, ISO 26262 Fonksiyonel Güvenlik Standardı kapsamında kavram aşamasında gerçekleştirilen Tehlike Analizi ve Risk Değerlendirmesi (HARA) süreci kritik önem taşımaktadır. HARA ile olası tehlikeli olaylar tanımlanmakta, risk seviyeleri değerlendirilmektedir. Bu analizler sonucunda güvenlik hedefleri belirlenmekte ve Automotive Safety Integrity Level (ASIL) sınıflandırmaları yapılmaktadır. Tanımlanan güvenlik hedefleri, ürün geliştirme sürecinin farklı tasarım seviyelerine yayılmakta ve uygun güvenlik tedbirleri sistematik biçimde uygulanmaktadır.

Özellikle, video veri iletim ve işleme sistemlerinde ortaya çıkabilecek donanımsal veya sistemik hatalar sürüş güvenliği açısından doğrudan kritik bir rol oynamaktadır. Görüntü donması, hatalı dönüştürme ya da veri iletimindeki gecikme, sürücüye yanlış veya yetersiz bilgi aktarılmasına sebep olabilmektedir. Bu nedenle söz konusu sistem algoritmasında hata tespit ve arıza korunumu mekanizmalarının etkin biçimde tasarlanması gerekmektedir.

Sonuç olarak, E/E bileşenler ile kamera tabanlı algı sistemlerinin, arıza koşullarında güvenli duruma geçebilecek şekilde yapılandırılması; açık ve ölçülebilir güvenlik hedeflerine sahip olması ve sistem bütünlüğünü koruyacak fonksiyonel güvenlik gereksinimlerini karşılaması, modern otomotiv güvenlik mimarilerinin vazgeçilmez bir unsuru olarak değerlendirilmektedir.

3.2.5 Siber Güvenlik Yönetimi:

ISO/SAE-21434, otomotiv endüstrisinde kullanılmak üzere geliştirilmiş bir siber güvenlik standardıdır. Günümüz araçları genel güvenlik standartları, müşteri talepleri ve gelişen ileri teknolojik etmenlerden

dolayı kamera, sensör ve yazılım ağırlıklı sistemler barındırmasından dolayı siber saldırılara müsait hale gelmiş bulunmaktadır. Bu bağlamda, ISO/SAE-21434 siber güvenlik standardı otomotiv için yön gösterici bir kılavuz olarak gösterilmektedir. Otomobil üreticileri ve alt yüklenici tedarikçiler geliştirdikleri ürünlerin donanım ve yazılım açısından siber güvenlik gereksinimlerini karşıladıklarını garanti etmek zorundadır.

4. SONUÇ

Bu bildiride, güvenlik gerekliliklerinin araç Elektrik-Elektronik (E/E) mimarisine entegrasyon süreci iki fonksiyon üzerinden incelenmiştir. Yapılan incelemelerde, yayınlanan regülasyonların sadece ilgili EKÜ'yu değil araç E&E mimarisi ve diğer etki alanına girilen EKÜ'lerin yapısında da değişiklik meydana getirebileceği gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, otomotiv güvenlik standartları yalnızca sistemlerin teknik yeterliliğini belirlemekle kalmamakta; aynı zamanda bu sistemlerin algoritmik doğruluğunu, sürücüyü etkileşim biçimlerini, elektrik elektronik entegrasyon mimarilerini ve olağan dışı durumlara karşı dayanıklılığını da şekillendiren temel unsurlar olarak karşımıza çıkmaktadır. İlgili standartların gerekliliklerine bağlı olarak, elektrik-elektronik araç mimarisinin kimi durumlarda sıfırdan tasarlanması, kimi durumlarda ise sınırlı ölçüdeki yapısal değişikliklerle devreye alınabilmesi mümkün olmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] MITRE Corp., *A Study on Real-World Effectiveness of Model Year 2015–2023 ADAS*, PR-25-0114, Jan. 2025.
- [2] UNECE WP.29, *Vehicle Regulations* (WP.29), 2024.
- [3] BlackBerry QNX, WP.29 Cybersecurity Vehicle Regulation Compliance, 2021.
- [4] J. Cicchino, “Effectiveness of forward collision warning and autonomous emergency braking systems in reducing front-to-rear crash rates,” *Accident Anal. Prev.*, vol. 107, pp. 213–221, 2017.
- [5] Reg. (EU) 2019/2144, *Official Journal of the European Union*, L 325/1, 27 Nov. 2019.
- [6] Community Preventive Services Task Force, “Motor Vehicle Injury: Alcohol- Impaired Driving: Ignition Interlocks,” *The Community Guide*, 2016.

- [7] M. Ehrnsperger et al., “Signal degradation through sediments on safety-critical radar sensors,” *Adv. Radio Sci.*, vol. 17, pp. 91–98, 2019.
- [8] J. Cicchino, “Effects of automatic emergency braking systems on pedestrian crash risk,” *Accident Anal. Prev.*, vol. 169, Art. 106863, 2022.
- [9] S. Abboud, “Industrial software effort estimation development and correction effort,” *J. Softw. Eng. Appl.*, vol. 18, no. 8, Aug. 2025.
- [10] T. Kaloor and I. Barosan, “A MBSE Framework for the Design and Analysis of Complex Automotive Systems Using SysML and PCE,” in *Proc. 2025 IEEE/IFIP International Conference on Dependable Systems and Networks*, Eindhoven, The Netherlands, 2025.
- [11] Z. F. Magosi, “A Survey on Modelling of Automotive Radar Sensors for Perception in ADAS,” *Sensors*, vol. 22, no. 15, Art. 5693, 2022.
- [12] B. Nolte, A. Stein, and T. Vietor, “Designing a Method for Identifying Functional Safety and Cybersecurity Requirements Utilizing Model-Based Systems Engineering,” *Applied System Innovation*, vol. 8, no. 2, Art. 45, 2025.
- [13] B. Arslan, B. Ahmet, A. A. Köroğlu, and H. Celap, “Otomotivde Kullanılan Elektrik Elektronik Fonksiyon Gereksinimleri ve Test Uygulamaları,” *11th International Automotive Technologies Congress (OTEKON 2024)*, Bursa, Türkiye, Sep. 9–10, 2024.
- [14] S. Pasumarthi and S. Manisha Vankayala, “A Comprehensive Review of Unified Diagnostic Services (UDS) in Automotive Systems: Architecture, Capabilities, Limitations and Future Perspective,” *International Journal of Engineering Research & Technology*, vol. 14, no. 09, Sep. 2025.
- [15] H. Zhang and D. Li, “Diagnostic Communication and Visual System based on Vehicle UDS Protocol,” *arXiv:2206.12653*, 2022.

Comparative Analysis Of Timer-Based Pulse Capture And Counter-Based Quadrature Decoding Methodologies For Industrial Drives

Ali Enes TEMİZKAN, Assoc. Prof. Mehmet DAL²

¹E-mail: alienestemizkan@gmail.com; ; Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü, Kocaeli / Türkiye.

²E-mail: mdal@kocaeli.edu.tr; Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü, Kocaeli / Türkiye.

Abstract

Precise angular velocity feedback is fundamental to high-performance motion control, yet the choice between encoder processing methods significantly impacts system stability. This study rigorously compares two primary speed estimation techniques—the high-resolution timer-based Pulse Capture (T-Method) and the hardware-accelerated Quadrature Encoder Counter (M-Method)—using a Model-Based Design approach with PLECS. We evaluated both methods on an STM32G474RE microcontroller, analyzing speed tracking accuracy and signal integrity in both RPM and angular velocity (rad/s) across a wide operating range (100–5400 RPM). Experimental results revealed critical performance trade-offs: while the Pulse Capture method offered superior resolution at low speeds, it suffered from severe timing jitter and mechanical noise at higher velocities, resulting in broad signal fluctuations (± 160 RPM) and visible overshoot during transient phases. Conversely, the Quadrature Encoder Counter method, utilizing x4 hardware decoding and pulse accumulation, effectively suppressed high-frequency jitter, delivering a significantly cleaner angular velocity signal with varying noise restricted to ± 30 –70 RPM. The study concludes that for robust industrial DC motor control, the superior signal stability and position tracking capability of the counter-based decoding outweigh the theoretical resolution claims of the timer-based capture, although a hybrid approach combining both methods is recommended for optimal performance across the full speed envelope.

Keywords: Angular Velocity, Experimental Analysis, Incremental Encoder, Quadrature Encoder Counter, Noise Stability, Speed Measurement, PLECS STM32 Target Support.

1. INTRODUCTION

The control performance of DC motors used in industrial robotic systems and precision positioning applications depends heavily on the quality of the speed feedback loop [1], [2]. In closed-loop control systems built around embedded microcontrollers such as the STM32 family, the accuracy and noise characteristics of digital signals derived from incremental encoders are among the most critical factors governing system stability [3]. Whether the controller employed is a classical PID or a modern

state-space formulation, its effectiveness hinges not only on tracking the average speed error (RPM) but also on measuring instantaneous angular velocity (rad/s) with minimal noise and high fidelity [4]. Consequently, the algorithm used to convert raw encoder pulses into a speed estimate is a fundamental design decision in any high-performance motor drive.

Incremental encoders have become the de-facto standard feedback sensor in industrial DC motor drives owing to their robustness and cost-effectiveness [5]. However, the conversion of raw digital pulses into meaningful velocity information is considerably more nuanced than a straightforward counting operation. Two primary algorithmic families are employed in practice: the frequency-measurement approach (M-Method / QEP), which counts the total number of pulses accumulated within a fixed sampling window, and the period-measurement approach (T-Method / CAP), which measures the elapsed time between consecutive encoder pulses. These two strategies exhibit fundamentally opposing trade-off profiles. The T-Method, implemented via the hardware Input Capture (CAP) module, delivers very high resolution at low speeds but is acutely sensitive to timing jitter arising from encoder disk manufacturing tolerances, shaft misalignment, and mechanical vibration, leading to large speed-signal fluctuations [7], [8]. Conversely, the M-Method, realized through the Quadrature Encoder Counter (QEP) in x4 decoding mode, naturally suppresses jitter through multi-pulse averaging and provides inherent direction and position information, yet suffers from quantization noise at low speeds [1], [2], [5], [6].

Despite the theoretical treatment of these trade-offs in the literature—Gurauskis et al. [3] on thermal and geometric encoder errors, Prokin [8] on T-Method noise sensitivity, and Vázquez-Gutiérrez [4] on the mathematical impact of pulse jitter on the control loop—a direct, hardware-level experimental comparison on a widely used microcontroller platform remains notably absent. Simulation and FPGA-based validations (e.g., Mishra [5]; Liu [6] on moving-average filtering) do not capture the real-world noise environment of a standard microcontroller-based embedded system.

The present work addresses this gap by conducting a systematic experimental comparison of the CAP (T-Method) and QEP (M-Method) speed estimation algorithms directly on the STM32G474RE Nucleo-64 microcontroller, using a Model-Based Design (MBD) workflow with PLECS for automatic code generation and STM32CubeMonitor for real-time data acquisition. Tests were performed across a wide speed range (approx. 100–5400 RPM) under a three-step duty cycle profile, and both RPM and angular velocity (rad/s) signals were analyzed. The principal contributions of this study are: (i) experimental demonstration that the CAP method produces noise bands of up to ± 160 RPM and exhibits visible overshoot during transients due to timing jitter at high speeds; (ii) experimental proof that the QEP

method with x4 decoding delivers approximately two times lower noise (± 30 –70 RPM band) and clean angular velocity signals at high speeds while also enabling direction detection and absolute position tracking, capabilities entirely absent in the CAP method; and (iii) a practical method-selection framework, including a proposed hybrid switching architecture that combines the low-speed resolution advantage of CAP with the high-speed stability and position-tracking capability of QEP to achieve optimal performance across the full operating envelope.

2. SPEED MEASUREMENT METHODS

In this study, two distinct speed estimation algorithms were implemented and compared in real-time.

2.1. Frequency Measurement (M-Method / QEP)

The M-Method was implemented using the STM32's Quadrature Encoder Counter (QEP) block. This method counts encoder pulses within a fixed sampling window (T_s). To maximize resolution, the timer is configured in x4 mode to count both rising and falling edges of channels A and B.

The QEP method is advantageous at high speeds and for position tracking. However, at low speeds, it suffers from quantization noise. For instance, at 1000 RPM with a 1 ms sampling time, the expected pulse count is approximately 6.67. Since the count must be an integer, the measured value oscillates between 6 and 7, causing artificial step noise.

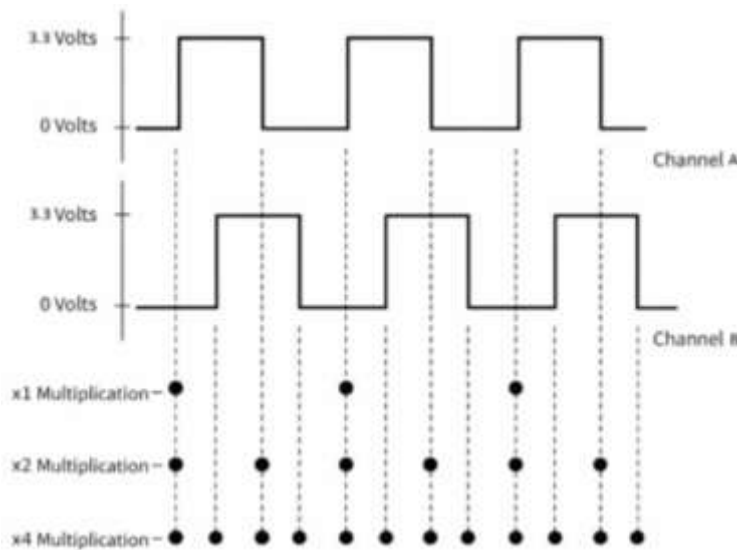


Figure 1: QEP x4 Mode Timing Diagram

The angular velocity (ω_m) in radians per second is calculated as follows:

$$\omega_m = \frac{dN_{counts} \cdot 2\pi}{N_{lines} \cdot 4 \cdot T_s}$$

Where: dN_{counts} is the number of pulses counted within the sampling period; N_{lines} is the physical line count of the encoder (100 PPR); T_s is the sampling period (1 ms).

2.2 Period Measurement (T-Method / CAP)

The T-Method was implemented using the STM32's Input Capture (CAP) module. This method measures the time elapsed between two consecutive encoder pulses based on the system's main clock. The TIM2 timer on the STM32G474RE is operated at 170 MHz, achieving a time resolution of 5.88 nanoseconds. The Input Capture module acts as a hardware event latch. The instant a rising edge is detected, the current counter value (CNT) is copied into the Capture/Compare Register (CCR) with zero latency. The difference between two consecutive capture values gives the pulse period.

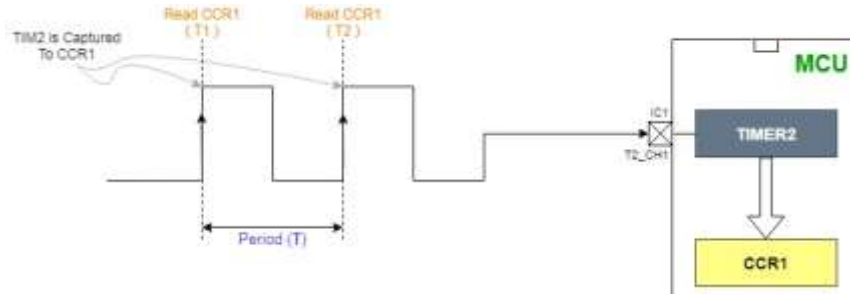


Figure 2: Input Capture (CAP) Timing Diagram [source required]

The angular velocity (ω_T) is derived from the measured period (dt_{pulse}):

$$\omega_T = \frac{2\pi}{N_{lines} \cdot 4 \cdot dt_{pulse}}$$

The theoretical error model is:

$$\omega_{error} \approx \frac{d_{jitter}}{dt_{pulse}^2}$$

3. HARDWARE SETUP AND EXPERIMENTAL RESULTS

3.1. Hardware System

The experimental verification was conducted using a Model-Based Design (MBD) approach integrating high-accuracy simulation with real-time hardware execution. The system hardware consists of the following:

Microcontroller: STMicroelectronics STM32G474RE Nucleo-64 development board, selected due to its advanced high-resolution timers (170 MHz). Motor Driver: Toshiba TB6612FNG dual-channel motor driver, featuring high-frequency PWM switching capability. DC Motor: 12V Brushed DC Motor equipped with a 100 PPR (Pulses Per Revolution) optical incremental encoder. Software Environment: PLECS (Plexim) Standalone for automatic code generation and External Mode datalogging, and STM32CubeMonitor for real-time signal visualization.

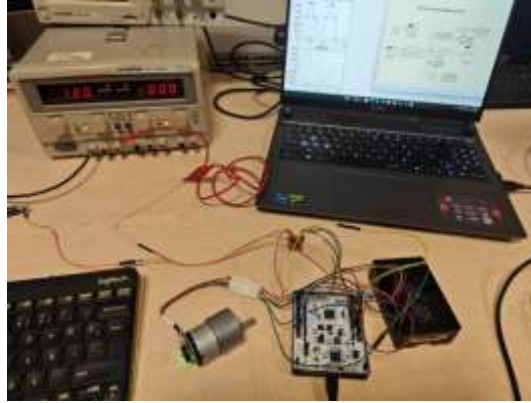


Figure 3: Experimental setup and measurement environment

3.2. Experimental Tests

In this section, the experimental performance of the QEP and CAP speed measurement methods is analyzed under four main headings: system input conditions, RPM-based comparison, angular velocity (AV)-based comparison, and direction/position tracking performance.

To understand the operating conditions, the input signals applied to the system and motor responses were examined. The test profile consists of a staircase duty cycle sequence incrementing in steps of 10%, 60%, and 95%.

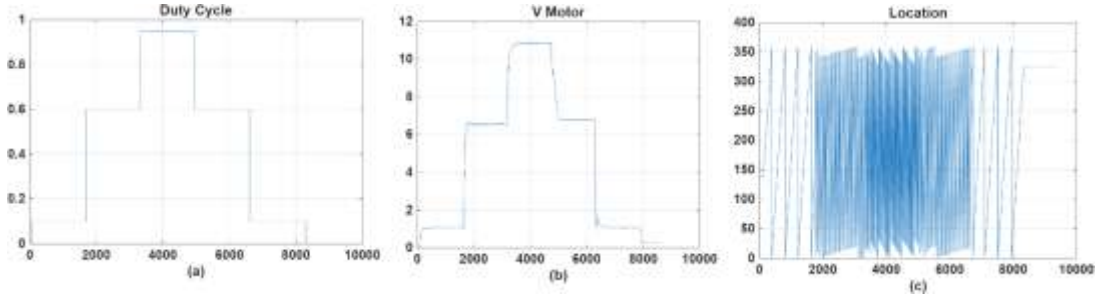


Figure 4. Experimental system variables: (a) Duty Cycle profile at 0.1, 0.6, and 0.95; (b) Corresponding Motor Armature Voltage response; (c) Encoder Location data showing continuous accumulation of the position counter.

As illustrated in Figure 4a, the duty cycle was increased in discrete steps to test the motor at low, medium, and high speeds. Figure 4b confirms that the motor voltage increases proportionally with the duty cycle. Figure 4c displays the raw encoder data, which forms the basis for both speed calculation methods.

The fundamental aim of this study is to compare the rotational speed estimation capabilities of the two algorithms in terms of RPM. Figure 5 presents a side-by-side comparison across the full speed range, focusing on low-speed (Step 1) and high-speed (Step 3) performance.

Test 1: At approximately 450 RPM (10% duty cycle), a distinct difference in signal quality is observed. The QEP method (Figure 5b) exhibits significant quantization noise with a stepped structure, because the number of encoder pulses counted within the fixed sampling window is very small at low speeds. In contrast, the CAP method (Figure 5e) provides a much smoother and continuous speed estimate by measuring the time period between pulses using a 170 MHz timer, clearly demonstrating T-Method superiority in the low-speed region.

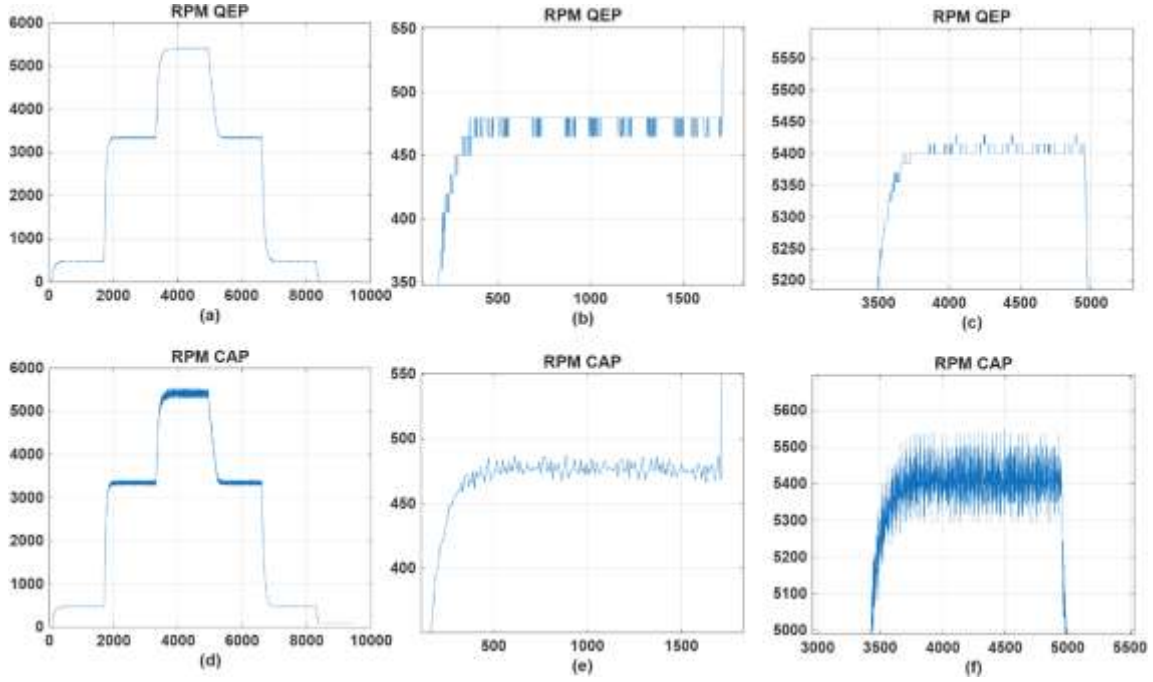


Figure 5: RPM measurement results: (a) Overview of QEP response; (b) Zoomed QEP at low speed (Step 1); (c) Zoomed QEP at high speed (Step 3); (d) Overview of CAP response; (e) Zoomed CAP at low speed (Step 1); (f) Zoomed CAP at high speed (Step 3).

Test 2: At approximately 5400 RPM (95% duty cycle), the performance characteristics are inverted. The QEP method (Figure 5c) maintains stability with relatively low noise since the fixed-window nature acts as a natural low-pass filter. The CAP method (Figure 5f) shows a marked increase in jitter noise because the time period between encoder pulses becomes extremely short at high speeds. The impact of this jitter grows quadratically with speed as expressed by Eq. (3).

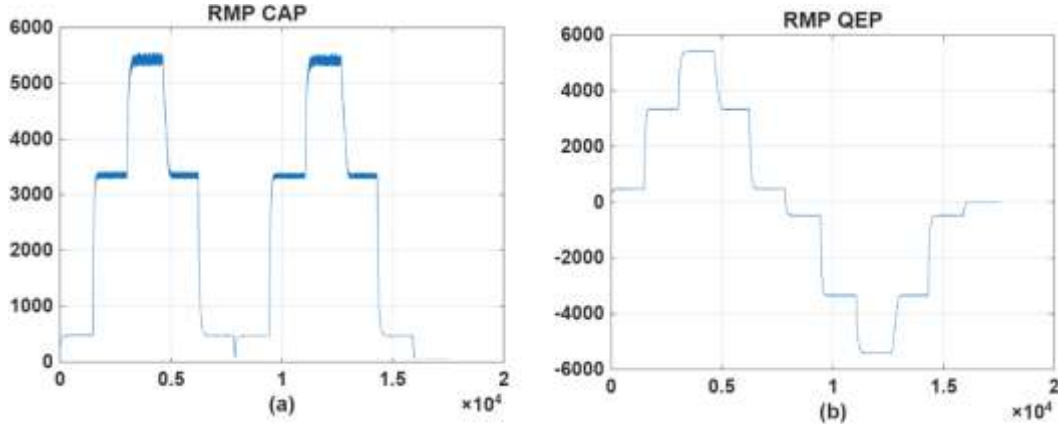


Figure 6: Bidirectional Control Test: (6b) Speed and Position measured by QEP (positive and negative values); (6a) Speed measured by CAP (positive magnitude only).

Test 3: To fully evaluate the dynamic behavior, a bidirectional test was conducted with the motor accelerated in both forward (+Direction) and reverse (−Direction) directions. As shown in Figure 6, the responses of the QEP and CAP methods to direction changes are fundamentally different.

Limitation: The QEP hardware detects rotation direction by sensing the 90-degree phase difference between channels A and B, updating the counter in the up (+1) or down (−1) direction. Thanks to this feature, the QEP method can flawlessly track both signed speed and absolute position. The graphs clearly show speed transitioning from positive to negative and the position returning to zero. The CAP method measures the time period between two pulses. Since time is always positive, the measured speed is only a scalar (absolute value) without inherent direction information. As seen in Figure 6a, even when the motor rotates in reverse, the CAP algorithm reports positive speed. Therefore, the CAP method alone is not suitable for precision position control; it is viable only for unidirectional speed regulation.

Signal Filtering and Noise Analysis – CAP Method

Unlike the QEP method, the CAP algorithm does not generate quantization noise at low speeds, as clearly evident in the stable low-speed regions (500 RPM and 3300 RPM plateaus) in Figure 7a and 7c. However, as motor speed approaches 5400 RPM, the time between consecutive encoder pulses shortens, causing high-frequency noise. To prevent this noise from affecting the closed-loop control system, a continuous first-order low-pass filter was applied to the raw RPM signal. The transfer function of the filter is:

$$H(s) = \frac{1}{\tau \cdot s + 1}$$

Here, τ is the filter time constant. A trade-off was established between suppressing the noise and not adding phase lag to the motor's response.

Figures 7b and 7d present the filtered CAP RPM results showing: (1) Suppression of high-speed noise: the wide noise band at 5400 RPM is almost completely flattened. (2) Smoothing of transient regions: sharp transitions are transformed into smooth curves suitable for control systems. (3) Preservation of low-speed precision: the low RPM plateaus maintain linearity and stability even after filtering, preserving the superior accuracy performance of the T-Method.

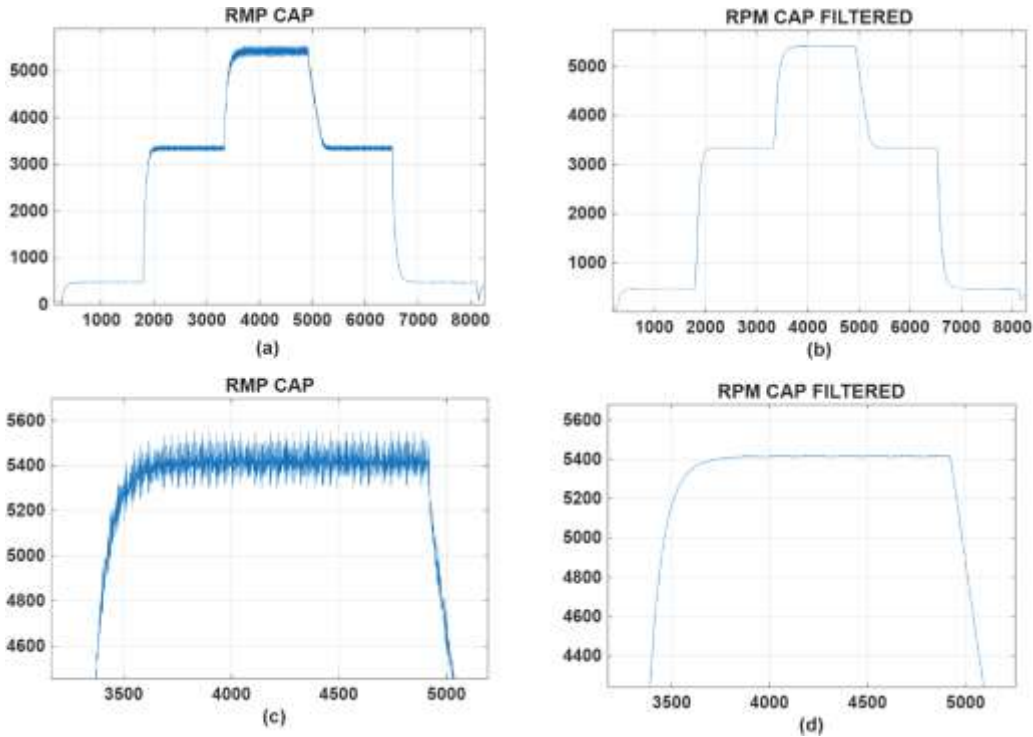


Figure 7: Raw vs. Filtered CAP RPM Signals: (a) Raw CAP Signal; (b) Filtered CAP Signal; (c) Zoomed Raw Signal; (d) Zoomed Filtered Signal.

3.3 Summary of Findings

The comparative experimental results are summarized in Table 1, highlighting the trade-offs between the two methods depending on the operating region.

Table 1. The comparative experimental results

Feature	QEP Method	CAP Method
Low Speed Stability	Low (Quantization noise)	High (High-resolution)
High Speed Stability	High (Natural averaging)	Low (Timing jitter)
Direction Detection	Available (Phase decoding)	Not available
Position Tracking	Possible (Absolute count)	Not possible

In conclusion, the data validates the theoretical expectation: Pulse Capture (T-Method) is superior for low-speed precision, whereas QEP (M-Method) is superior for high-speed stability and position tracking. To achieve optimal performance across 0–5400 RPM, a hybrid approach switching between these two methods at a specific speed threshold (e.g., 2000 RPM) would yield the best results.

CONCLUSIONS

The experimental results clearly demonstrate that the success of speed measurement algorithms depends heavily on operating speed and hardware capabilities. The QEP (M-Method) exhibited superior stability at high speeds but suffered from resolution issues at low speeds, in full agreement with the theory of low-speed limitations of fixed sampling time methods stated by Tsuji et al. (2001). On the other hand, the CAP (T-Method) eliminated quantization error at low speeds but became increasingly sensitive to timer resolution and jitter at higher speeds. This study proved that even on a standard microcontroller, the CAP method can provide servo-quality feedback at very low speeds (e.g., 10–50 RPM).

The obtained data reveals that a single method is not optimal for the entire speed range (0–5400 RPM). Therefore, the most significant implication of the study is the need for a Hybrid Speed Estimator that dynamically switches algorithms at a specific transition speed. This approach is critically important for industrial applications such as robotic manipulators and CNC machines, which require both very slow precise positioning and very fast displacement.

This study conducted a rigorous experimental comparison of the Pulse Capture (T-Method/CAP) and the Quadrature Encoder Counter (M-Method/QEP) on the STM32G474RE microcontroller using a Model-Based Design approach. Key findings: (1) The CAP method provides superior signal quality and resolution at low speeds, while QEP delivers significantly higher stability and noise immunity at high speeds. (2) The QEP method is essential for applications requiring direction detection and absolute

position tracking. (3) A first-order low-pass filter effectively mitigates high-frequency jitter noise of the CAP method at high speeds. (4) For systems requiring full-range optimal performance, a hybrid switching approach between CAP and QEP is recommended. These results provide practical guidance for motor control engineers selecting encoder measurement strategies for industrial DC motor applications.

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

The authors of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

REFERENCES

- [1] Hacı A, Čurković M. Accurate FPGA-Based Velocity Measurement with an Incremental Encoder by a Fast Generalized Divisionless MT-Type Algorithm. *Sensors*. 2018;18(10):3250. Available from: <https://doi.org/10.3390/s18103250>
- [2] da Silva LLR, et al. A Novel Method for Determining Angular Speed and Acceleration Using Sin-Cos Encoders. *Sensors*. 2021;21(2):577. Available from: <https://doi.org/10.3390/s21020577>
- [3] Gurauskis D, Kilikevičius A, Kasparaitis A. Thermal and Geometric Error Compensation Approach for an Optical Linear Encoder. *Sensors*. 2021;21(2):360. Available from: <https://doi.org/10.3390/s21020360>
- [4] Vázquez-Gutiérrez Y, O'Sullivan DL, Kavanagh RC. Small-Signal Modeling of the Incremental Optical Encoder for Motor Control. *IEEE Trans Ind Electron*. 2020;67(5):3452-3461. Available from: <https://doi.org/10.1109/TIE.2019.2913354>
- [5] Mishra P, Banerjee A, Ghosh M. FPGA Based Real-Time Implementation of Quadral-Duty Digital PWM Controlled Permanent Magnet BLDC Drive. *IEEE/ASME Trans*

Mechatronics. 2020;25(3):1456-1467. Available from:

<https://doi.org/10.1109/TMECH.2020.2975148>

- [6] Liu C, Jiang J, Jiang J, Zhou Z. Enhanced Grid-Connected Phase-Locked Loop Based on a Moving Average Filter. IEEE Access. 2019; 7:179509-179520. Available from: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2958831>
- [7] UTC Synchronized Signal Generation for Synchrophasors and Sampled Values Measurements. Energies. 2022;15(19):7095. Available from: <https://doi.org/10.3390/en15197095>
- [8] Prokin M, et al. Comparisons of digital speed measurement methods for motor drives. IEEE Trans Ind Electron. 2013. Available from: <https://doi.org/10.1109/TIE.2013>.

Otomotiv Sabit Cam Yapıştırma Proseslerinin İncelenmesi: Primerli ve Primersiz Sistemlerin Karşılaştırılması

Onur KOZBAY

onur.kozbay@tofas.com.tr; TOFAŞ Türk Otomobil Fabrikası AR-Ge Merkezi; BURSA / Türkiye.

Özet

Otomotiv endüstrisinde sabit cam bileşenlerinin (ön cam, arka cam, sabit yan/quarter cam ve panoramik tavan camı) poliüretan (PU) bazlı yapıştırıcılar kullanılarak araç gövdesine bağlanması; araç rijitliği, çarpışma güvenliği, sızdırmazlık performansı ve NVH karakteristiklerini doğrudan etkileyen kritik bir montaj prosesi olarak değerlendirilmektedir. Bu çalışma, cam bileşenlerinin üretim sonrası süreçlerinden OEM montaj hatlarına kadar uygulanan yapıştırma proseslerinin uçtan uca sistematik bir değerlendirmesini sunmaktadır. Çalışma kapsamında, primerli ve primersiz yapıştırma sistemleri karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Frit (seramik kaplama) kalitesi, yüzey temizleme prosedürleri, aktivatör uygulamaları ve primer gereksinimleri gibi temel proses parametreleri detaylı şekilde ele alınmıştır. Ayrıca poliüretan boncuk geometrisi, uygulama parametreleri, robotik ve manuel montaj yöntemleri ile gövde boya yüzeyi hazırlama süreçleri incelenmiştir. Sıcaklık, nem ve yüzey enerjisi gibi çevresel koşulların proses performansı üzerindeki etkileri de değerlendirilmiştir. Yapışma dayanımı, sızdırmazlık ve dayanıklılık testleri gibi doğrulama prosedürleri; yaygın kalite hataları ile birlikte incelenmiştir. Potansiyel proses hatalarının belirlenmesi ve azaltılması amacıyla PFMEA ve RPN metodolojilerine dayalı risk odaklı bir yaklaşım uygulanmıştır. Ayrıca primerli ve primersiz sistemlerin ekonomik etkilerini karşılaştırmak amacıyla cam bileşeni başına örnek bir maliyet modeli geliştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, primerli sistemlerin daha yüksek proses dayanıklılığı ve güvenlik marjı sağladığını; buna karşın primersiz sistemlerin proses sadeleşmesi, çevrim süresinin azaltılması ve genel maliyet verimliliği açısından avantaj sunduğunu göstermektedir. Bu nedenle primersiz sistemler, çeşitli otomotiv uygulamalarında giderek daha fazla tercih edilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Cam, Poliüretan, Primer, Yapıştırma

Abstract

In the automotive industry, bonding fixed glazing components (windshield, rear window, fixed side/quarter glass, and panoramic roof glass) to the vehicle body using polyurethane (PU)-based adhesives is a critical assembly process that directly affects vehicle stiffness, crash safety, sealing performance, and NVH characteristics. This study presents a systematic end-to-end evaluation of the bonding processes applied to glazing components from post-production to OEM assembly lines. Within the scope of this work, primed and primerless bonding systems are comparatively analyzed. Key process parameters such as frit (ceramic coating) quality, surface cleaning procedures, activator application, and primer requirements are discussed in detail. In addition, polyurethane bead geometry, application parameters, robotic and manual assembly methods, and body paint surface preparation

processes are examined. The influence of environmental conditions, including temperature, humidity, and surface energy, on process performance is also addressed. Validation procedures such as adhesion strength, sealing, and durability tests are reviewed alongside common quality defects. A risk-based approach using PFMEA and RPN methodologies is applied to identify and mitigate potential process failures. Furthermore, a sample cost model per glass component is developed to compare the economic impact of primed and primerless systems.

The results indicate that while primed systems provide higher process robustness and safety margins, primerless systems offer advantages in process simplification, reduced cycle time, and overall cost efficiency, making them increasingly preferred in various automotive applications.

Keywords: Glass, Polyurethane, Primer, Adhesion

1. GİRİŞ

Günümüz otomotiv endüstrisinde sabit cam sistemleri; yalnızca sürüş görüşünü sağlayan veya kabin izolasyonuna katkıda bulunan bileşenler olmaktan çıkmış, araç gövdesinin yapısal davranışına doğrudan etki eden fonksiyonel elemanlar haline gelmiştir. Özellikle ön cam uygulamaları; gövde rijitliği, çarpışma dayanımı, airbag sisteminin doğru çalışması, su ve hava sızdırmazlığı ile NVH (Noise, Vibration, Harshness) performansı açısından kritik görev üstlenmektedir. Bu nedenle sabit camların araç gövdesine bağlanmasında kullanılan yapıştırma prosesleri, modern araç mimarisinin önemli mühendislik alanlarından biri olarak değerlendirilmektedir. Yapıştırma hattında meydana gelen proses yetersizlikleri; su alma, rüzgâr sesi, optik hizasızlık, trim uyumsuzluğu ve müşteri algı kalitesinin düşmesi gibi problemlere yol açabilmekte, daha kritik durumlarda ise camın gövdeden ayrılması nedeniyle ciddi güvenlik riskleri oluşturabilmektedir.

Literatürde otomotiv cam yapıştırma teknolojileri, yalnızca bir montaj operasyonu olarak değil; yapısal bir birleştirme yöntemi olarak ele alınmaktadır. Poliüretan (PU) bazlı yapıştırıcıların özellikle ön cam uygulamalarında yüksek enerji sönmüleme kapasitesi, elastik davranışı ve uzun dönem dayanımı sayesinde tercih edildiği bildirilmektedir. Ayrıca ön camın çarpışma sırasında yerinde kalmasının yolcu güvenliği açısından kritik olduğu ve bu gerekliliğin FMVSS 212 gibi regülasyonlarla desteklendiği belirtilmektedir (National Highway Traffic Safety Administration, n.d.; Sika, n.d.). Bunun yanında modern araçlarda geniş cam yüzeylerinin ve panoramik tavan uygulamalarının yaygınlaşması, yapıştırma proseslerinin önemini daha da artırmıştır.

Cam bonding performansının yalnızca kullanılan yapıştırıcının mekanik özelliklerine bağlı olmadığı; yüzey hazırlığı, frit (serigrafi) kalitesi, aktivatör ve primer uygulamaları, çevresel koşullar ve uygulama parametreleriyle birlikte değerlendirilmesi gerektiği vurgulanmaktadır. Özellikle frit yüzeyindeki kontaminasyon, düşük yüzey enerjisi veya hatalı temizleme işlemleri; yapışma dayanımında ciddi kayıplara neden olabilmektedir (3M, 2019). Primerli sistemlerde primer tabakası; yapışmayı artıran, yüzey varyasyonlarını tolere eden ve UV dayanımına katkı sağlayan ara katman görevi görmektedir. Buna karşılık primersiz (primerless) sistemlerde özel formülasyona sahip PU yapıştırıcılar sayesinde primer adımı ortadan kaldırılmakta ve doğrudan temiz frit yüzeyine yapışma sağlanmaktadır (Akfix, n.d.; DuPont, 2021).

Son yıllarda otomotiv üreticileri arasında primerless sistemlere yönelik eğilimin arttığı görülmektedir. Bunun temel nedenleri arasında proses adım sayısının azalması, çevrim süresinin kısılması, otomasyona uygunluk ve toplam üretim maliyetinin düşürülmesi yer almaktadır. Literatürde primerless sistemlerin, uygun yüzey hazırlığı ve kontrollü proses koşulları sağlandığında yüksek performans gösterebildiği ifade edilmektedir (DuPont, 2021; Sika, 2022). Bununla birlikte primerless uygulamalarda frit yüzey kalitesi, kontaminasyon kontrolü ve aktivasyon prosedürlerinin daha kritik hale geldiği; bu nedenle proses disiplininin primerli sistemlere kıyasla daha hassas yönetilmesi gerektiği belirtilmektedir.

Bu çalışma kapsamında otomotiv sektöründe yaygın olarak kullanılan primerli ve primersiz sabit cam yapıştırma sistemleri sistematik olarak incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Çalışmada; yüzey hazırlama süreçleri, frit özellikleri, aktivatör ve primer uygulamaları, PU boncuk geometrisi, çevresel koşullar, robotik ve manuel uygulama yöntemleri ile kalite doğrulama prosedürleri detaylı olarak değerlendirilmiştir. Ayrıca proses riskleri PFMEA yaklaşımıyla analiz edilmiş, primerli ve primerless sistemlerin teknik ve ekonomik etkileri karşılaştırmalı olarak ele alınmıştır. Böylece otomotiv cam bonding proseslerinde sistem seçimine yönelik mühendislik bakış açısının ortaya konulması amaçlanmıştır.

2. MALZEMELER VE SİSTEM BİLEŞENLERİ

Cam yapıştırma sistemi, birbiriyle etkileşimli birden fazla katman ve malzeme unsurunun bir arada performans göstermesiyle çalışır. Bu nedenle değerlendirme, tek bir “yapıştırıcı” üzerinden değil; cam tarafı bağlanma yüzeyi, gövde tarafı boya sistemi, yüzey hazırlığı kimyasalları ve uygulama parametreleri bütünlüğü üzerinden yapılmalıdır.

2.1.SERİGRAFI – CAM TARAFI BAĞLANMA YÜZEYİ

Frit (seramik siyah bant), camın iç yüzeyine uygulanarak fırınlama sonrası kalıcı hale getirilen seramik kaplamadır. Temel görevleri; poliüretan (PU) yapıştırıcıyı UV etkilerinden korumak, yapışma için uygun yüzey enerjisi ve pürüzlülüğü sağlamak ve yapıştırma hattını görsel olarak maskelemektir. Frit yüzeyinde özellikle yüzey enerjisi ($\geq 34-38$ mN/m), pürüzlülük ($R_a \approx 0.8-1.6$ μ m), bant sürekliliği ve düşük kontaminasyon seviyesi kritik kalite parametreleri olarak değerlendirilmektedir. Primerless sistemlerde yapışma performansı doğrudan frit yüzeyine bağlı olduğundan, kirli veya düşük kaliteli frit bölgeleri yapışma dayanımını önemli ölçüde düşürebilmektedir.

2.2.AKTİVATÖR / CLEANER–PROMOTER

Aktivatör (cleaner/promoter), frit ve/veya boyalı gövde yüzeyindeki yağ, toz ve silikon benzeri kirleticilerin giderilmesini sağlayarak yüzey enerjisini artırmakta ve poliüretan (PU) yapıştırıcının yüzeyi daha iyi ıslatmasına yardımcı olmaktadır. Ayrıca yüzeyde kimyasal aktivasyon oluşturarak yapışma performansını desteklemektedir. Uygulama sırasında kontaminasyonun yayılmaması için yüzeyin tek yönde silinmesi, lint-free tek kullanımlık bez kullanılması ve uygulama sonrasında yüzeye temas edilmemesi kritik önem taşımaktadır. Aktivator uygulamasından sonra yaklaşık 30–120 saniyelik flash-off/buharlaştırma süresi beklenmekte olup bu süre kullanılan ürün ve ortam koşullarına bağlı olarak değişebilmektedir.

2.3.PRİMER

Primer, çoğunlukla siyah renkli ve poliüretan (PU) yapıştırıcı ile uyumlu bir ara tabaka olup yapışma performansını artırmak amacıyla kullanılmaktadır. Primer uygulaması; yüzey varyasyonlarının tolere edilmesine yardımcı olmakta, özellikle kenar bölgelerinde UV bariyeri oluşturarak uzun dönem dayanımı desteklemekte ve boyalı yüzeylerdeki mikro kusurların etkisini azaltmaktadır. Bazı sistemlerde ayrıca korozyon riskini azaltıcı bariyer etkisi de sağlamaktadır.

Primer uygulamasında flash-off/kuruma süresi kritik parametrelerden biridir ve genellikle OEM şartlarına bağlı olarak 10–15 dakika arasında değişmektedir. Uygulama sırasında yüzey sıcaklığının tercihen 10°C üzerinde olması önerilmekte, yüksek bağıl nem koşullarında (%80+ RH) ise primer filminde bozulma veya beyazlama riski oluşabilmektedir.

2.4.PU CAM MACUNU

PU macun, cam ile gövde arasındaki yapısal bağlantıyı sağlayan ve yük taşıyan ana yapıştırıcı elemandır. Uygulama performansı; boncuk geometrisi, open time ve kür koşullarına bağlı olarak değişmektedir. Cam tipi ve tasarıma göre boncuk yüksekliği genellikle 8–12 mm aralığında uygulanmakta, boncuk formu ise çoğunlukla üçgen (V-shape) geometrisinde tercih edilmektedir. PU yapıştırıcının open time süresi tipik olarak 5–15 dakika arasında değişmekte olup bu süre; ortam sıcaklığı, nem ve ekipman koşullarından etkilenmektedir. Kür mekanizması nem ile gerçekleştiğinden, ortam sıcaklığı ve bağıl nem kür hızını doğrudan belirleyen temel çevresel parametreler olarak değerlendirilmektedir.

3. PROSES AKIŞI (OEM MONTAJ HATTI) – UÇTAN UCA TANIM

Aşağıdaki akış, sahada en yaygın kullanılan standardize yaklaşımı temsil eder. İstasyon sayısı ve sıralama OEM'e göre değişse de fonksiyonel adımlar benzerdir. Bu süreç, Şekil 1 ile gösterilmiştir:



Şekil 1. Montaj Hattı- Cam Yapıştırma Proses Akışı

4. ROBOTİK VE MANUEL UYGULAMA KARŞILAŞTIRMASI

Cam bonding prosesinde robotik ve manuel uygulama yaklaşımları, aynı kimyasal sistem kullanılsa dahi kalite değişkenliğini belirgin şekilde etkileyebilmektedir. Robotik uygulamalar tekrarlanabilirlik ve çevrim kararlılığı sağlarken; manuel uygulamalar esneklik sunmakla birlikte operatör kaynaklı varyasyonu artırabilmektedir.

Tablo 1. Robotik ve Manuel Uygulamaların Karşılaştırması (Aktivatör/Primer/PU)

UYGULAMA TİPİ	AVANTAJLAR	RİSKLER / DİKKAT NOKTALARI
ROBOTİK UYGULAMA	Boncuk yüksekliği, hız, mesafe ve bindirme (overlap) parametrelerinde yüksek tekrarlanabilirlik sağlar. Operatör etkisinin azalmasıyla proses varyasyonu düşer ve yüksek hacimli üretimde stabil kalite elde edilir. Kamera, lazer profil ölçümü ve ağırlık takibi gibi inline kontrol sistemleriyle entegre edilebilir.	Model revizyonlarında robot path yeniden öğretimi ve değişiklik yönetimi gerektirir. Nozzle aşınması, tıkanma veya akış kararlılığı bozulması boncuk geometrisini etkileyebilir. TCP/offset/fixture toleranslarına bağlı kalibrasyon sapmaları konum hatalarına ve gap/flush sapmalarına yol açabilir.
MANUEL UYGULAMA	Düşük yatırım gerektirir ve prototip/düşük hacimli üretimlerde operasyonel esneklik sağlar. Geçici üretim modlarında hızlı adaptasyon imkânı sunar.	Operatör yorgunluğu ve kişi bazlı uygulama farkları nedeniyle boncuk yüksekliği ve formu değişkenlik gösterebilir. Head-tail overlap eksikliği, kesinti veya “ince hat” oluşumu su alma ve NVH problemlerini artırabilir. Aktivator/primer uygulamasında atlama veya tekrar silme riski yüksektir; hatalar çoğu zaman geç aşamada (garanti sahasında) ortaya çıkar.

5. ÇEVRESEL KOŞULLARIN ETKİSİ (SICAKLIK–NEM–HAVA AKIMI)

PU sistemleri ve primer kimyası çevre koşullarına duyarlıdır. Düşük sıcaklık koşullarında PU viskozitesinin artması boncuk formunun bozulmasına, ıslanmanın azalmasına ve kür hızının yavaşlamasına neden olur. Yüksek sıcaklık koşullarında ise boncuk yayılabilir, open time kısalabilir ve setting sonrası çökme artabilir. Nem, özellikle 1K PU sistemlerde kür mekanizmasının temel girdisi olduğundan; düşük nemde kür yavaşlar ve SDA yönetimi kritikleşir. Buna karşılık yüksek bağıl nem koşullarında primer film kalitesi bozulabilir, yüzeyde beyazlama/defekt görülebilir. Proses kararlılığı açısından tipik hedef bandın 21–27°C sıcaklık ve %45–60 RH nem aralığında tutulması; primer flash-off alanlarında türbülansın minimize edilmesi önerilmektedir.

6. CAM TİPİNE GÖRE PROSES VARYASYONLARI

Ön cam uygulamalarında yapısal gereksinim ve airbag performansı ile doğrudan ilişki nedeniyle proses güvenliği ön plandadır. Bu nedenle robotik uygulama oranı yüksek olmakta, primerli sistemler geleneksel olarak güçlü tercih olmaya devam etmekte; primerless kullanılacaksa kapsamlı doğrulama altyapısı gerekmektedir. Arka camlarda yapısal gereksinim genellikle orta seviyededir; ancak sızdırmazlık ve estetik kritik olduğundan boncuk sürekliliği ve head-tail overlap kontrolü belirleyici

olmaktadır ve primerless sistemler yaygın kullanılmaktadır. Quarter cam ve sabit yan camlarda yapışma alanı görece küçük olduğundan lokal zayıflıkların etkisi büyük; manuel uygulama görülebilse de robotik kalite avantajı daha belirgindir. Panoramik tavanda UV maruziyeti ve termal genleşme yüksek olduğundan, geniş yüzeyde setting parametreleri ile UV bariyer güvenliği daha kritik hale gelir ve primerli sistemler daha sık tercih edilmektedir.

7. PRİMERLİ VE PRİMERLESS SİSTEMLERİN TEKNİK KARŞILAŞTIRMASI

Primerli sistemler, yüzey varyasyonlarına toleransı artıran ve adhezyonu güçlendiren ara katman sayesinde proses penceresini genişletebilir; kopma modunun çoğunlukla yapıştırıcı kohesif kopmaya yönelmesi sistem sağlamlığının göstergesi olarak değerlendirilebilir. Primerless sistemler ise doğru frit ve doğru yüzey hazırlığı ile yüksek performans sağlayabilmekle birlikte, kır/serigrafi zayıflığına daha duyarlı hale gelmektedir. UV dayanımı açısından primerli sistemler özellikle kenar bölgelerinde daha güçlü bariyer sunarken, primerless sistemlerde frit kalitesi ve bant genişliği daha kritik hale gelmekte ve sistem tasarımına bağımlılık artmaktadır. Proses karmaşıklığında primerli sistem daha fazla adım içerdiğinden hata olasılığı, özellikle primer atlama riski artar; primerless sistemde adım sayısının azalması prosesin daha “robust” hale gelmesine katkı sağlayabilir. Üretim hızı açısından primerless daha kısa çevrim süresi ve daha az istasyon ihtiyacı ile otomasyona daha uygun bir yapı sunarken, primerli sistem flash-off süreleri nedeniyle çevrimi uzatabilir ve alan/istasyon ihtiyacını artırabilir.

8. DOĞRULAMA TESTLERİ (LAB + HAT + ARAÇ SEVİYESİ)

Laboratuvar seviyesinde lap shear testleri kayma dayanımı için temel göstergeler sunarken, T-peel testleri sızdırmazlık problemlerine daha duyarlı bir değerlendirme sağlar. Termal şok ve iklim döngüsü testleri, -30/+80°C gibi sıcaklık aralıklarında ve yüksek nem çevrimlerinde dayanımın korunmasını doğrular. UV yaşlandırma sonrası mekanik test tekrarları, uzun dönem UV etkisinin yapışma performansına etkisini ortaya koyar. Kimyasal direnç testleri; cam suyu, yakıt buharı, yağ ve deterjan gibi maruziyetler sonrası performans düşüşünü izler. Kopma modu analizi, yapıştırıcı içi kohesif kopma ile ara yüzeyde adhesif kopmayı ayırt ederek kök neden analizi için kritik veri üretir.

Hat üzeri doğrulamalarda boncuk kesit ölçümü ile yükseklik-genişlik-form ve overlap kontrol edilir; primer hattı sürekliliği ve kontaminasyon izleri görsel doğrulama ile izlenir. Gap/flush kontrolleri, tasarım toleranslarına uygunluğu doğrular; su testleri sızdırmazlık performansını sahaya yakın koşullarda değerlendirir. Proses sapmalarını erken yakalamak için hızlı yapışma kontrolleri ve denetim planı kapsamında periyodik doğrulamalar uygulanır. Araç seviyesinde ise ön cam tutunma beklentileri, çatı ezilme/torsiyon yükleri (özellikle tavan camı) ve NVH kriterleri (rüzgâr sesi, titreşim, su sesi) performansın toplam araç fonksiyonuna etkisini doğrular (National Highway Traffic Safety Administration, n.d.).

9. MALİYET MODELİ (CAM BAŞINA SÜREÇ MALİYETİ)

Cam başına maliyet; kimyasal tüketim, işçilik, hat amortismanı ve fire/yeniden işleme bileşenleriyle toplam olarak değerlendirilmelidir. Tipik olarak PU macun tüketimi 40–70 g/cam aralığında değişirken, aktivator tüketimi 0–1.5 g/cam aralığında kalmaktadır. Primerli sistemde ek olarak 0.6–1.0 g/cam primer tüketimi söz konusudur. Örnek bir OEM hattı için verilen aralıklarda primerli sistemin toplam maliyeti yaklaşık 0.48–0.75 €/cam, primerless sistemin toplam maliyeti ise

yaklaşık 0.31–0.55 €/cam olarak modellenebilir. Bununla birlikte primerless sistemin maliyet avantajı, frit kalitesi ve proses disiplinine bağlıdır; düşük frit kalitesinde kalite maliyeti (garanti/fire) primerless avantajını azaltabilir.

10. KALİTE HATALARI (DEFECT MODLARI) ve PFMEA/RPN DEĞERLENDİRMESİ

Prosesin risk odaklı yönetiminde PFMEA ve RPN yaklaşımı, potansiyel hata modlarının şiddet, oluşma olasılığı ve tespit edilebilirlik açısından nicelleştirilmesini sağlar, Tablo 2. Primer atlama, aktivator flash-off yetersizliği, serigrafi kontaminasyonu ve boncuk geometrisi sapmaları sahada en sık karşılaşılan kritiklikler arasındadır. Ayrıca camın yanlış oturması (setting) gap/flush bozukluğu ve NVH problemlerine yol açabilir; ortam koşullarının limit dışına çıkması ise kür/film bozukluklarını tetikleyebilir.

Tablo 2. *PFMEA Kapsamında Hata Modları ve Rpn Değerlendirmesi*

HATA MODU	TİPİK ETKİ	S	O	D	RPN
Primer skipping (atlanması)	Lokal debonding, güvenlik riski	10	4	7	280
Aktivator flash-off yetersiz	Solvent kapanı, zayıf yapışma	9	5	6	270
Serigrafi kontaminasyonu	Primerless'ta kritik zayıflama	9	3	7	189
Boncuk yüksekliği hatası	Su alma / NVH / gap-flush	7	6	4	168
Head-tail overlap eksik	Lokal su alma	8	5	4	160
Boncuk form bozukluğu	Dayanım/sızdırmazlık düşüşü	7	5	4	140
Cam yanlış oturma (setting)	Gap/flush bozukluğu, NVH	6	4	5	120
Ortam koşulları limit dışı	Kür/film bozukluğu	6	3	4	72

Bu hata modlarının kök nedenleri incelendiğinde primer skipping çoğunlukla manuel uygulamada atlama, robot nozul/akış problemi veya görsel doğrulama eksikliğinden beslenmektedir. Flash-off yetersizliği ise zaman penceresi kontrolsüzlüğü, üretim baskısı ve ortam sıcaklık-nem sapmalarının birlikte etkisiyle ortaya çıkabilmektedir. Boncuk geometrisi hataları nozzle aşınması, robot path kalibrasyon kayması ve manuel uygulamada operatör yorgunluğu gibi nedenlerle tetiklenirken; overlap eksikliği sıklıkla programlama hatası veya başlangıç-bitiş senkronizasyon problemlerinden kaynaklanmaktadır. Bu riskleri azaltmaya yönelik olarak primer hattı için kamera/kontrast doğrulama, flash-off için kilitlemeli poka-yoke zamanlayıcı, PU boncuk için inline lazer profil ölçümü, kimyasal lot/raf ömrü izlenebilirliği ve kontaminasyon yönetimi (eldiven değişimi, bez tek kullanım, istasyon temizliği) gibi önlemler önerilmektedir.

11. TREND ANALİZİ

Primerless kullanımının artışı, adım sayısını ve hata olasılığını düşürmesi ile çevrim süresini kısaltması üzerinden açıklanmaktadır. Robotik uygulamanın yaygınlaşması, tekrarlanabilirlik ihtiyacı ve inline kalite izleme gereksinimi ile doğrudan ilişkilidir. EV platformlarında rijitlik beklentisinin artması ve NVH hassasiyetinin yükselmesi, daha sıkı tolerans yönetimini ve bazı platformlarda daha yüksek modüllü PU ihtiyacını gündeme getirmektedir. Buna ek olarak panoramik tavan ve geniş ön cam

tasarımlarında termal genleşme ve UV etkileri daha baskın hale geldiğinden, proses disiplininin (özellikle yüzey hazırlığı, boncuk geometrisi ve kür penceresi yönetimi) daha kritik hale geldiği gözlenmektedir.

SONUÇ VE TARTIŞMA

Cam yapıştırma prosesinin nihai performansı, tek bir malzeme seçimiyle açıklanamayacak kadar çok parametreye bağlı, çok değişkenli bir üretim problemidir. Serigrafi (frit) tabakasının sürekliliği ve yüzey karakteri, cam ve gövde tarafında yapılan temizlik/aktivasyonun doğruluğu, primerin varlığı veya yokluğu, PU macunun boncuk geometrisi ve şekil stabilitesi, yerleştirme (setting) sırasında camın doğru kuvvetle ve doğru konumda oturtulması, ayrıca sıcaklık–nem gibi çevresel koşulların kararlılığı aynı anda yönetilmediğinde; en iyi kimyasal sistem dahi beklenen dayanımı, sızdırmazlığı ve NVH performansını sahada sürdürülebilir biçimde veremez. Bu nedenle cam bonding sürecinin “başarısı”, aslında kimyasalın katalog performansından çok, proses disiplininin ve kontrol mimarisinin gerçek üretim şartlarında ne kadar sağlam kurulduğunun bir sonucudur.

Bu çalışmanın genel çıktısı, primerli ve primerless sistemlerin “mutlak iyi/kötü” şeklinde değil, uygulama bağlamına göre değerlendirilmesi gerektiğini net biçimde göstermektedir. Primerli sistemler, özellikle serigrafi yüzeyinde veya boyalı gövde yüzeyinde oluşabilecek varyasyonları belirli ölçüde tolere edebilen, yapışma mekanizmasına ek bir güvenlik katmanı ekleyen yaklaşım olarak öne çıkar; bu sayede kritik camlarda daha geniş bir proses penceresi ve daha yüksek güvenlik marjı sağlar. Ön cam gibi airbag performansına doğrudan etki eden, araç yapısal davranışında rol alan ve regülasyon/OEM kriterlerinin en yüksek olduğu uygulamalarda primerli sistemin sağladığı tolerans penceresi değerlidir. Benzer şekilde panoramik tavan gibi geniş yapışma alanına sahip, UV yükünün ve termal çevrimlerin daha baskın olduğu camlarda da primerin UV bariyer katkısı ve ara yüzey dayanımlılığı, uzun dönem sağlamlık açısından mühendislik riskini düşürür. Ancak primerli sistemin teorik avantajı, proses adım sayısının artmasıyla birlikte yeni hata sınıflarını da devreye sokar; özellikle primer atlama (primer skipping), hatalı film kalınlığı, primerin tozlanması, flash-off süresinin doğru yönetilememesi gibi riskler pratikte primerli sistemin dayanım avantajını azaltabilir ve bazı durumlarda primerless’a kıyasla daha yüksek kalite maliyeti doğurabilir. Dolayısıyla primerli sistem seçiminin gerçek anlamda güvenli olabilmesi, primer uygulamasının “var/yok ve süreklilik” doğrulamasının robust biçimde kurulmasına, zaman pencerelerinin kilitlenmesine ve kontaminasyon kontrol disiplininin tavizsiz işletilmesine bağlıdır.

Primerless sistemler ise esas gücünü prosesin sadeleşmesinden alır. Primer adımının ortadan kalkması, çevrim süresini kısaltırken aynı zamanda operatör ve istasyon kaynaklı varyasyonları azaltır; bu da özellikle robotik uygulamayla birleştğinde daha tekrarlanabilir boncuk geometrisi, daha stabil sızdırmazlık performansı ve daha düşük hata oranı olarak sahaya yansıyabilir. Birçok platformda arka cam, sabit yan cam ve quarter cam uygulamalarında primerless sistemlerin standarda dönüşmesinin temel nedeni, yapıştırma hattını daha az adımla yönetebilmesi ve üretim bantlarında hatayı “fırsat penceresi” düzeyinde azaltmasıdır. Bununla birlikte bu yaklaşımın hassas noktası, artık serigrafi yüzeyinin ve yüzey hazırlığının müzakere edilemez hale gelmesidir; primerin telafi edebildiği bazı yüzey kusurları veya enerji dalgalanmaları, primerless sistemde doğrudan performans kaybına dönüşebilir. Bu nedenle primerless’a geçiş kararının yalnızca kimyasal maliyet farkı üzerinden verilmesi

doğru değildir; serigrafi kalitesinin (yüzey enerjisi, pürüzlülük, süreklilik, kontaminasyon davranışı) ve boyalı yüzey uyumunun sistematik doğrulanması, ayrıca hat içi temizlik/aktivasyon standartlarının sıkılaştırılması primerless başarısının ön koşuludur. Aksi halde primerless sistemin kısa vadede sağladığı maliyet ve hız kazanımı, su alma/NVH şikâyetleri, rework çevrimleri ve garanti maliyetiyle orta vadede eriyebilir.

Tartışmanın merkezinde, sahada en çok tekrar eden iki proses penceresi bulunmaktadır: flash-off yönetimi ve boncuk geometrisi yönetimi. Aktivatorün yeterince uçmadan yapıştırıcının yüzeyle temas etmesi, ara yüzeyde solvent kapanı ve zayıf ıslanma yaratarak yapışma dayanımını düşürür; primerli sistemde buna primer film bozukluğu riski de eklenir. Bu problem çoğu zaman “malzeme tutmuyor” şeklinde yorumlansa da kök nedenin önemli bir kısmı zaman pencerelerinin gerçek üretimde kilitlenmemesi, operatör/hat hız baskısı ve çevresel koşulların stabil olmamasıdır. Benzer şekilde boncuk yüksekliği, üçgen formun korunması, kesinti olmaması ve head-tail overlap bölgesinin doğru bindirilmesi; sızdırmazlık, rüzgâr sesi ve gap/flush sonuçlarının doğrudan belirleyicisidir. Birçok su alma vakasında kimyasalın nominal dayanımı yeterli olmasına rağmen, boncuğun lokal incilmesi, bindirmenin açık kalması veya setting sırasında camın boncuğu kontrolsüz ezmesi nedeniyle mikroskobik kaçak yolları oluşur. Bu nedenle proses mühendisliği açısından gerçek kalite sıçraması, “daha iyi yapıştırıcı”dan önce, boncuğun geometrisini ölçen ve sürekliliğini güvence altına alan kontrol mimarisinin kurulmasıyla sağlanır; robotik uygulamanın yaygınlaşmasının ana faydası da burada ortaya çıkar.

Güvenlik boyutu tartışıldığında, özellikle ön cam uygulamalarında “SDA (safe drive-away) ve kür penceresi” yönetimi kritik bir risk alanıdır. PU sistemlerinin nemle kürlenmesi, gerçek kür hızının ortam sıcaklığı ve bağıl neme bağlı olarak değişmesi anlamına gelir; bu da üretim hattında aynı yapıştırıcının farklı gün ve vardiyalarda farklı gerçekleşen kür davranışları gösterebileceğini ortaya koyar. Dolayısıyla SDA’yı yalnızca ürün datasheet’inde yazan nominal değer olarak ele almak yetersizdir; en kötü koşul senaryosuna göre (minimum sıcaklık, düşük nem, cam/gövde kütlesi, hat içi bekleme süreleri) güvenlik marjı kurulmalı ve sevkiyat/araç hareketi planı buna göre yönetilmelidir. Bu nokta, primerli veya primerless seçiminin ötesinde, prosesin güvenlik uyumluluğunu belirleyen temel unsurlardan biridir.

Yeni nesil araç trendleri de konuyu farklı bir boyuta taşımaktadır. Elektrikli araç platformlarında gövde rijitliği beklentisinin artması ve NVH hassasiyetinin yükselmesi, cam bonding hattının toleranslarını daraltmakta; büyük cam yüzeyleri (geniş ön camlar, panoramik tavanlar) termal genleşme ve UV maruziyeti nedeniyle uzun dönem dayanım riskini artırmaktadır. Bu gerçeklik, gelecekte “tek tip proses” yaklaşımı yerine, cam fonksiyonuna göre optimize edilmiş hibrit stratejilerin daha rasyonel olacağını düşündürmektedir. Pratikte bu, ön cam ve panoramik tavan gibi kritik uygulamalar için primerli veya çok yüksek performanslı primerless çözümlerin kapsamlı doğrulama ile kullanılması; arka cam, sabit yan cam ve quarter camlarda ise primerless + robotik uygulama kombinasyonunun maliyet/kalite açısından en dengeli çözüm olması şeklinde özetlenebilir. Burada belirleyici olan, seçilen sistemin sadece laboratuvar değerleri değil, hat içi disiplinle sürdürülebilir kılınmasıdır.

Sonuç olarak cam yapıştırma prosesinde başarı; doğru kimyasalı seçmek kadar, hatta çoğu zaman ondan daha fazla, proses kontrol mimarisini doğru kurmaya bağlıdır. Primerli sistemler yüzey varyasyonlarını tolere eden daha geniş bir güvenlik penceresi sunarak kritik camlarda önemli bir seçenek olmaya devam

ederken, primerless sistemler adım sayısını azaltması, otomasyona uyumu ve toplam maliyet avantajı sayesinde birçok cam tipinde standarda dönüşmektedir. Bununla birlikte nihai performans; flash-off sürelerinin kilitlenmesi, kontaminasyonun sistematik olarak önlenmesi, boncuk geometrisinin ölçülmesi ve izlenmesi, setting parametrelerinin standardize edilmesi ve süreç izlenebilirliğinin (lot/raf ömrü/parametre kaydı) disiplinli yönetilmesiyle sağlanan üretim olgunluğunun bir ürünü olarak değerlendirilmelidir. Bu çerçevede, primerli–primerless seçimi bir “malzeme tercihi” değil, cam fonksiyonu, yüzey kalitesi, hat otomasyonu ve kalite maliyeti hedefleriyle birlikte ele alınması gereken stratejik bir proses kararıdır.

KAYNAKÇA

- 3M. (2019). *Glass bonding process steps: Technical bulletin*. 3M.
- Akfix. (n.d.). *Polyurethane windshield adhesive primer: Technical data sheet*. Akfix.
- ASTM International. (n.d.). *ASTM D1876: Standard test method for peel resistance of adhesives (T-peel test)*. ASTM International.
- ASTM International. (n.d.). *ASTM D3163: Standard test method for determining strength of adhesively bonded rigid plastic lap-shear joints in shear by tension loading*. ASTM International.
- DuPont. (2021). *BETASEAL™ primerless-to-glass adhesives*. DuPont Mobility & Materials.
- International Organization for Standardization. (n.d.). *ISO 4587: Adhesives — Determination of tensile lap-shear strength of rigid-to-rigid bonded assemblies*. ISO.
- International Organization for Standardization. (n.d.). *ISO 11339: Adhesives — T-peel test for flexible-to-flexible bonded assemblies*. ISO.
- International Organization for Standardization. (n.d.). *ISO 4892 series: Plastics — Methods of exposure to laboratory light sources*. ISO.
- National Highway Traffic Safety Administration. (n.d.). *FMVSS 212: Windshield mounting*. U.S. Department of Transportation.
- National Highway Traffic Safety Administration. (n.d.). *FMVSS 216: Roof crush resistance*. U.S. Department of Transportation.
- OEM internal specifications, control plans, PFMEA documents, and validation protocols related to automotive glass bonding systems. (n.d.). *Confidential internal documents*.
- Polyurethane adhesive, activator, and primer system supplier technical documents, including TDS, SDS, and application guidelines. (n.d.). *Technical documentation*.
- Sika. (n.d.). *Polyurethane: The windshield adhesive*. Sika.
- Sika. (2022). *Sikaflex® SOLO: Primerless polyurethane adhesive for automotive glass*. Sika Industry.

Araçlarda kullanılan Cam Önü Plastik Parçalar: Fonksiyonel Rolü, Malzeme ve Üretim Süreçlerine Genel Bakış

Hilal ALIN

hilal.alin@tofas.com.tr; TOFAŞ Türk Otomobil Fabrikası A.Ş., Ar-Ge Merkezi, BURSA / Türkiye.

Özet

Bu yazı, otomotiv cam önü plastik parçalarının fonksiyonel rolünü, yaygın kullanılan malzemeler, üretim ve montaj yöntemlerini ile performans/kalite gereksinimlerini tanımlayıcı bir bakış açısıyla sunmak amacı ile hazırlanmıştır. Cam önü plastikleri, ön cam altındaki hava akışı ve su drenajı yönetimi, silecek mekanizmasının montajına desteği, motor bölmesi havalandırması ile araç içi akustiğe katkı sağlama gibi çoklu görevler üstlenir. Endüstride yaygın olarak ASA, PP, PBT ve PC/ABS gibi UV dayanımlı termoplastikler tercih edilir; insert veya overmolding uygulamalarıyla fonksiyonel elemanlar entegre edilir. Üretim genellikle enjeksiyon kalıplama temellidir; kaynak, klips/vida ve sızdırmazlık contaları ile montaj sağlanır. Performans değerlendirmeleri; su geçirmezlik/drainage testleri, NVH ölçümleri, ölçü stabilitesi, UV/termal yaşlandırma ile mekanik dayanım testlerini içerir. Tasarım zorlukları arasında karmaşık ve genellikle uzun geometri nedeniyle warp ve sink-mark riskleri, atıklık problemleri, sızdırmazlık konuları, tırnak bağlantıları, yüzey estetiği gereksinimleri yer alır. Ayrıca geri dönüşüm oranı çevresel dayanım kriterleri modern uygulamalarda belirleyici olmaktadır. Bu yazıda cam önü plastik parçalarının fonksiyonu anlamak ve üretim dahil süreçlere genel bir bakış oluşması için hazırlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Cam önü plastikleri, su drenajı, silecek montajı, termoplastik, enjeksiyon kalıplama, NVH, yüzey kalite

Abstract

This paper provides a general overview of plastic front cowl grill components used in vehicles, focusing on their functional roles, common material choices, manufacturing and assembly methods, and performance/quality requirements. The cowl grille (cowl panel) performs multiple functions: manage airflow and rainwater drainage at the below corner of the windshield, supporting wiper mechanism assembly, engine ventilation and contributing to inside cabin acoustics. Industry preferred materials include UV-resistant thermoplastics such as ASA, PP, PBT, and PC/ABS; functional elements are often integrated via inserts or overmolding. Production is based on injection molding, with assembly achieved through welding, clips/screws, and sealing gaskets. Performance evaluations commonly include watertightness/drainage tests, NVH measurements, dimensional stability checks, UV/thermal aging, and mechanical durability testing. Key design and manufacturing challenges are warp and sink-mark risk due to complex and often elongated geometries, flash/scrap management, sealing integrity, retention/clip design, and surface aesthetic requirements. Recyclability and environmental resistance are more criteria in modern applications. This review target to clarify the function of cowl grille parts and provide a general perspective on the performance.

Keywords: cowl grille, drainage, wiper mounting, thermoplastics, injection molding, NVH, surface quality, recyclability.

GİRİŞ

Otomotiv sektöründe plastik malzeme kullanımı son yıllarda önemli ölçüde artış göstermiştir. Hafiflik, tasarım esnekliği, maliyet avantajı ve üretim kolaylığı gibi nedenlerle plastik parçalar modern araç mimarisinin vazgeçilmez bileşenleri haline gelmiştir (Brydson, 1999; Strong, 2006). Özellikle dış trim parçalarında kullanılan mühendislik plastikleri hem estetik beklentileri karşılamakta hem de fonksiyonel gereksinimlere çözüm sunmaktadır (Harper, 2000).

Cam önü plastik parçaları, ön cam ile motor bölmesi arasında konumlanan ve genel olarak “cowl grille”, “cowl top cover” veya “windshield lower trim” olarak adlandırılan dış trim elemanlarıdır. Bu parçalar ilk bakışta yalnızca dekoratif bir kaplama elemanı gibi değerlendirilse de araç performansı ve kullanıcı konforu açısından kritik görevler üstlenmektedir.

Bu bölge; yağmur suyunun tahliye edilmesi, HVAC sistemine temiz hava yönlendirilmesi, silecek sisteminin desteklenmesi ve ön cam çevresindeki hava akışının düzenlenmesi açısından oldukça önemlidir (Hucho, 1998). Ayrıca modern araçlarda ADAS sistemleri, yağmur sensörleri, kamera modülleri ve çeşitli elektronik bileşenlerin ön cam çevresine yerleştirilmesi, cam önü plastik parçalarının mühendislik açısından önemini daha da artırmıştır.

Elektrikli araçların yaygınlaşmasıyla birlikte aerodinamik performans ve NVH gereksinimleri daha kritik hale gelmiştir (SAE International, 2018). İçten yanmalı motor gürültüsünün azalması, rüzgâr ve titreşim kaynaklı seslerin daha belirgin algılanmasına neden olmakta; bu durum cam önü plastik parçalarının akustik performansını doğrudan önemli hale getirmektedir, Şekil 1.



Şekil 1. Elektrikli araçlarda cam önü plastik parçalarının

1. Cam Önü Plastik Parçalarının Fonksiyonel Roller

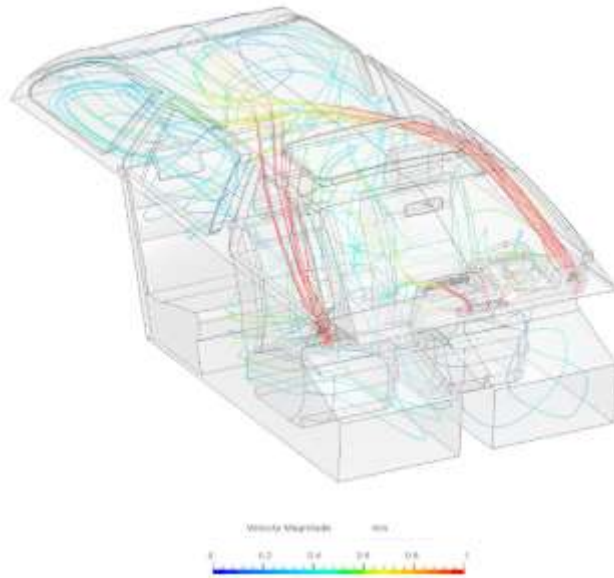
Su Drenajı ve Su Yönetimi

Cam önü plastik parçalarının en temel görevlerinden biri ön cam üzerinden gelen yağmur suyunun kontrollü şekilde tahliye edilmesini sağlamaktır. Ön cam yüzeyinden akan suyun HVAC hava girişine veya motor bölmesindeki hassas elektronik sistemlere ulaşması engellenmelidir.

Bu amaçla parçalar üzerinde özel drenaj kanalları, eğimli yüzeyler ve yönlendirme geometrileri tasarlanmaktadır. Yetersiz drenaj tasarımı aşağıdaki problemlere neden olabilmektedir:

- Kabin içerisine su sızıntısı,
- HVAC sisteminde nem ve buğulanma,
- Elektriksel arızalar,
- Korozyon oluşumu,
- Gürültü artışı.

Bunun yanında cam önü bölgesi, hava akışının ön cam boyunca yön değiştirdiği kritik alanlardan biridir. Aerodinamik açıdan optimize edilmiş yüzeyler sayesinde rüzgâr sesi azaltılmakta ve sürüş konforu artırılmaktadır. Bu nedenle tasarım süreçlerinde CFD (Computational Fluid Dynamics) analizleri ile su akışı simülasyonları gerçekleştirilmektedir, Şekil 2, (Pope, 2009).



Şekil 2. Cam önü plastik parçası ve ön cam çevresinde gerçekleştirilen CFD tabanlı hava akışı analizi sonucu elde edilen hız dağılımı ve akış çizgileri görünümü (Pope, 2009).

Silecek Mekanizması Entegrasyonu

Cam önü plastik parçaları çoğu araçta silecek mekanizmasının montajına destek sağlayan yapısal elemanlardır. Silecek motoru ve bağlantı sistemleri bu bölgenin altında konumlandırılmaktadır. Bu nedenle parçaların:

- Yüksek rijitliğe,
- Titreşim dayanımına,
- Mekanik mukavemete,
- Boyutsal stabiliteye sahip olması gerekmektedir.

Titreşimlerin kontrol altına alınamaması durumunda ses problemleri, bağlantı gevşemeleri ve yorulma hasarları oluşabilmektedir. Bu nedenle lokal rib yapıları ve metal insert uygulamaları tercih edilmektedir.

2. Kullanılan Malzemeler

Cam önü plastik parçaları sürekli olarak UV ışıınımı, sıcaklık değişimleri, nem ve kimyasal etkilere maruz kaldığından yüksek çevresel dayanım göstermelidir (Osswald & Menges, 2012). Yaygın kullanılan malzemeler:

- PP (Polipropilen),
- ASA,
- PBT,
- PC/ABS,
- Cam elyaf takviyeli termoplastiklerdir.

Özellikle ASA malzemeleri UV dayanımı ve yüzey estetiği nedeniyle dış trim uygulamalarında yaygın olarak tercih edilmektedir.

3. Üretim Süreçleri

3.1 Enjeksiyon Kalıplama

Cam önü plastik parçalarının üretiminde en yaygın yöntem enjeksiyon kalıplamadır. Büyük yüzey alanına ve karmaşık geometrilere sahip olmaları nedeniyle kalıp tasarımı kritik öneme sahiptir (Rosato, Rosato, & Schott, 2000). Üretim süreci temel olarak:

1. Hammadde eritme,
2. Kalıba enjeksiyon,

3. Soğutma,
4. Kalıptan çıkarma aşamalarından oluşmaktadır.

Ancak bu tür büyük geometrili parçalarda:

- Warp,
- Sink-mark,
- Kaynak izi,
- Boyutsal sapma,
- Yüzey dalgalanması gibi problemler oluşabilmektedir.

3.2 Yüzey Kalitesi ve Tekstür Yapıları

Cam önü plastik parçaları araç dışından doğrudan görülebilen yüzeylerdir. Bu nedenle yüzey estetiği müşteri algısı açısından oldukça önemlidir. Bu parçalarda yaygın olarak:

- P130,
- P126
- P1310,
- Mikro grain texture gibi yüzey desenleri kullanılmaktadır.

Bu yüzeyler:

- Çizik görünürlüğünü azaltır,
- Güneş yansımalarını düşürür,
- Premium görünüm sağlar.

4. Performans ve Kalite Testleri

Cam önü plastik parçalarının doğrulama süreçlerinde birçok çevresel ve mekanik test uygulanmaktadır.

Başlıca testler:

- Su geçirmezlik testleri,
- Drenaj performans testleri,
- UV yaşlandırma testleri,
- Termal çevrim testleri,

- Mekanik dayanım testleri,
- NVH ölçümleri,
- Boyutsal stabilite kontrolleridir (ASTM International, 2021).

Özellikle UV yaşlandırma testleri dış trim parçalarında kritik önem taşımaktadır (International Organization for Standardization [ISO], 2013). Uzun süreli güneş ışığı maruziyeti sonucunda renk değişimi ve yüzey çatlakları oluşabilmektedir.

5. Gelecek Trendleri

Elektrikli ve otonom araç teknolojilerinin gelişmesiyle birlikte cam önü plastik parçalarının mühendislik gereksinimleri daha karmaşık hale gelmektedir.

Gelecekte öne çıkan trendler:

- Akıllı yüzey teknolojileri,
- Kendi kendini temizleyen mikro yapılar,
- Geri dönüştürülmüş termoplastikler,
- Entegre sensör çözümleri,
- Hafifletilmiş ince cidarlı tasarımlar.

Özellikle lotus effect benzeri mikro yüzey teknolojileri sayesinde suyun yüzeyi temizlemesi hedeflenmektedir.

SONUÇ VE TARTIŞMA

Cam önü plastik parçaları modern araçlarda yalnızca estetik amaçlı kullanılan dış trim elemanları değil; su drenajı, hava akışı yönetimi, NVH performansı, silecek sistemi entegrasyonu ve çevresel dayanım açısından kritik görevler üstlenen mühendislik bileşenleridir.

Malzeme teknolojilerindeki gelişmeler, üretim süreçlerindeki ilerlemeler ve sürdürülebilirlik gereksinimleri bu parçaların tasarımını doğrudan etkilemektedir. Özellikle elektrikli araçlar ve ADAS sistemlerinin yaygınlaşmasıyla birlikte bu parçaların fonksiyonel önemi daha da artmaktadır.

Sonuç olarak cam önü plastik parçaları, otomotiv sektöründe fonksiyonel tasarım, malzeme mühendisliği ve üretim teknolojilerinin birleştiği stratejik bileşenlerden biri olarak değerlendirilmektedir.

KAYNAKÇA

- ASTM International. (2021). *Standard test methods for plastics and polymeric materials*. ASTM International.
- Brydson, J. A. (1999). *Plastics materials* (7th ed.). Butterworth-Heinemann.
- Harper, C. A. (2000). *Handbook of plastics, elastomers, and composites*. McGraw-Hill.
- Hucho, W. H. (1998). *Aerodynamics of road vehicles* (4th ed.). SAE International.
- International Organization for Standardization. (2013). *ISO 4892 series: Plastics — Methods of exposure to laboratory light sources*. ISO.
- Osswald, T. A., & Menges, G. (2012). *Materials science of polymers for engineers* (3rd ed.). Hanser Publications.
- Pope, A. (2009). *Wind tunnel testing* (2nd ed.). Wiley.
- Rosato, D. V., Rosato, D. V., & Schott, N. R. (2000). *Injection molding handbook* (3rd ed.). Springer.
- SAE International. (2018). *Automotive NVH standards and measurement procedures*. SAE International.
- Strong, A. B. (2006). *Plastics: Materials and processing* (3rd ed.). Pearson Prentice Hall.

Otomotiv Camlarının Sürücü ve Yolcu Güvenliğine Etkileri

Hilal ALIN

hilal.alin@tofas.com.tr; Tasarım Uzmanı, TOFAŞ Türk Otomobil Fabrikası A. Ş. Ar-Ge Merkezi,
Bursa / Türkiye.

Özet

Otomotiv camları — ön cam, yan/arka camlar ve sabit camlar — yolcu güvenliğinde önemli rol oynar; çarpışma davranışı, sürücü görüş, sensör performansı ve iç konfor üzerinde doğrudan etkileri vardır. Cam türü ve montaj yöntemi, darbe anındaki davranışı belirler: temperli camlar kırıldıklarında küçük parçacıklara ayrılarak kesik riskini azaltır ancak parçaların araçtan ayrılabilmesi nedeniyle dışarı fırlamayı engellemede sınırlıdır. Lamine camlar ise içerdiği ara katman (PVB) sayesinde cam çatlasa dahi parçaları bir arada tutar [3], [5], [6]; bu sayede dışarı fırlama ve büyük cisim girişlerini önemli ölçüde azaltır. Doğru yapıştırma uygulamaları lamine ön camın gövde rijitliğine de katkı yaparak çarpışma performansını iyileştirebilir. Optik özellikler (distorsiyon, parlama, geçirgenlik) sürücünün algısını ve tepki süresini etkiler [1], [8] ; bu özellikler ADAS ile kamera/sensör doğruluğu açısından kritiktir [1], [10] . Akustik PVB ye sahip ön camlar ayrıca NVH konforunu artırarak dolaylı şekilde sürücü yorgunluğunu azaltıp güvenliği destekleyebilir. Üretim ve montaj süreçleri, yapıştırma uygulaması ve kürlenme süreci, cam kenar işlemleri, sızdırmazlık ve iklimsel dayanıklılık uzun vadeli performans için önemli kriterlerdir. Proses kontrolleri ve dayanıklılık testlerinin uygulanması, yolcu güvenliğinin artırılmasına yönelik etkili önlemlerdir.

Anahtar Kelimeler: Otomotiv camları, lamine cam, temperli cam, güvenlik camları, optik özellikler, ADAS uyumlu ön cam, NVH, üretim kontrolü, dışarı fırlama önleme.

Abstract

Automotive glazing including the windshield, side and rear windows, and fixed glass plays a key role in occupant safety by influencing crash performance, driver visibility, sensor performance and inside cabin comfort. Glass type and mounting method determine behavior under impact: when tempered glass fractures into small fragments that reduce the risk of cutting injuries but may detach from the vehicle, providing limited resistance to occupant ejection. Laminated glass, with its polyvinyl butyral (PVB) interlayer, holds fragments together after cracking, substantially reducing ejection and large-object intrusion. When properly assembled, laminated windshields also contribute to body stiffness and can improve crash performance. Optical properties (distortion, glare, transmissivity) directly affect driver perception and reaction time and are critical for ADAS and camera/sensor accuracy. Windshields with acoustic interlayers (e.g., PVB variants) enhance NVH comfort and can indirectly support safety by reducing driver fatigue. Manufacturing and assembly factors adhesive application and curing, edge finishing, sealing, and climatic durability are decisive for long-term performance. Enforce strict process controls, and conducting durability testing are effective measures to improve occupant safety..

Keywords: automotive glazing, laminated glass, tempered glass, safety glass, optical properties, ADAS-compatible windshield, NVH, manufacturing control, occupant ejection prevention.

GİRİŞ

Otomotiv camı üretimi, modern araçların dinamik taleplerine göre uyarlanmış malzeme bilimi, makine mühendisliği ve optik fiziğini bir araya getiren çok disiplinli bir süreçtir. Cam üretiminde kullanılan temperleme ve laminasyon teknikleri; optik görüş kalitesi, termal konfor ve mekanik dayanımı artırmaya yönelik gelişmiş teknolojiler ile desteklenmektedir (Pilkington, t.y.; AGC Automotive, t.y.). Elektrikli ve otonom araç teknolojilerinin gelişmesiyle birlikte otomotiv camlarının rolü yalnızca pasif güvenlik unsuru olmaktan çıkmış; ADAS sistemleri, sensör entegrasyonu ve aktif güvenlik uygulamalarının temel bileşenlerinden biri haline gelmiştir (SAE International, t.y.; Robertson, t.y.).

Şekil 1’de otomotiv sektöründe yaygın olarak kullanılan lamine ve temperli cam türleri gösterilmektedir. Lamine cam yapısında bulunan PVB ara katmanı sayesinde kırılma sonrasında cam parçalarının dağılması engellenmekte ve yolcu güvenliği artırılmaktadır. Temperli cam ise ısıtılma sonucu yüksek mukavemet kazanmakta ve kırıldığında küçük parçalara ayrılarak yaralanma riskini azaltmaktadır (ECE R43, t.y.; Saint-Gobain Sekurit, t.y.).



Şekil 1- Otomotiv sektöründe kullanılan lamine ve temperli cam yapılarının şematik gösterimi

1- Otomotivde Kullanılan Cam Türleri

- **Lamine Cam (Laminated Glass)**

Özellikleri:

İki cam tabakası arasında yer alan PVB (Polivinil Bütiral) ara katmanı sayesinde yüksek darbe dayanımı ve güvenlik sağlar.

Avantajları:

Kırılma durumunda cam parçaları dağılmaz ve ara katman üzerinde tutunur. Bu sayede sürücü ve yolcuların yaralanma riski azalır, ayrıca araç dışına fırlama riski önemli ölçüde düşer.

- **Temperli Cam (Tempered Glass)**

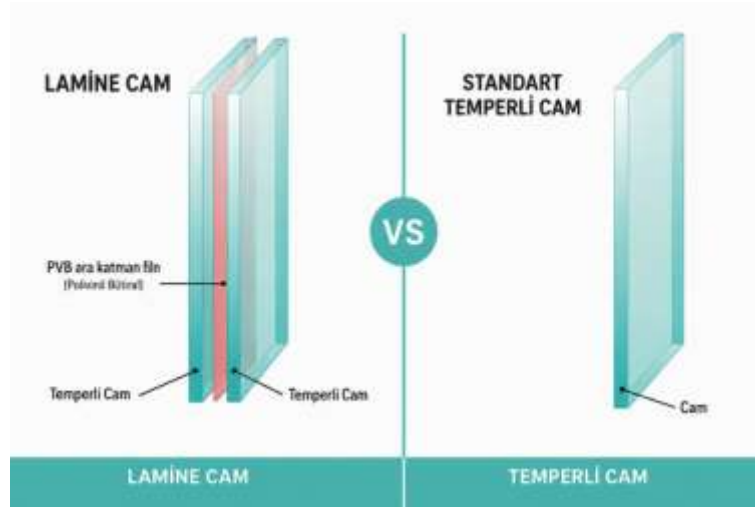
Özellikleri:

Isıl işleme güçlendirilmiş olup yüksek mukavemet ve dayanıklılık sağlar.

Avantajları:

Kırıldığında küçük ve keskin olmayan parçalara ayrılır. Bu özelliği sayesinde yaralanma riskini azaltır ve güvenlik açısından önemli bir katkı sağlar.

Şekil 2’de lamine ve temperli camların kırılma davranışları karşılaştırmalı olarak gösterilmektedir. Lamine camlarda kırılma sonrasında parçalar PVB katmanı üzerinde tutulurken, temperli camlarda küçük granül parçalanma meydana gelmektedir. Bu farklı kırılma davranışı, yolcu güvenliği ve araç dışına fırlama riskinin azaltılması açısından kritik öneme sahiptir (ECE R43, t.y.; AGC Automotive, t.y.).



Şekil 2- Lamine ve temperli camların kırılma davranışlarının karşılaştırılması (SAE International, t.y.).

2- Çarpışma Performansı, Optik Özellikler ve NVH

Modern araçlarda cam, dış etkenlerden basit korumanın çok ötesinde işlevlere sahiptir. Malzeme ve teknolojiye gelişmelerle birlikte, otomotiv camları artık konforu, güvenliği, enerji verimliliğini artırmada kritik bir rol oynamaktadır. Aşağıda araçlarda kullanılan camların etkilediği parametreler ile sağladığı avantajlar görülebilmektedir.

Tablo 1- Otomotiv camlarının güvenlik, optik performans, ADAS uyumu ve NVH üzerindeki etkileri.

Parametreler	Avantajlar
Çarpışma Performansı	Doğru yapıştırma uygulamaları lamine ön camın gövde rijitliğine katkı yaparak gövde torsiyon rijitliğini artırır, tavan dayanımını destekler.
Optik Özellikler	Distorsiyon (görüntüde bozulma), Parlama (glare), Işık geçirgenliği, Çift görüntü oluşumu gibi etkilerin en aza indirilerek sürücünde tepki süresini kısaltır, gece sürüşü iyileştirir ve görüş netliğini belirler. Ayrıca termal konfor sağlayarak iç mekânda enerji tüketimini azaltır, UV etkilerine karşı korur.
ADAS ve Sensör Teknolojileri	Kamera görüş kalitesi sağlayarak ileri teknoloji şerit takip sistemleri, otonom araç kullanımı, sürücü yorgunluk algılama, yağmur sensörleri vb sistemlerin düzgün çalışmasını sağlar.
NVH	Akustik özellikte PVB ile Yol ve rüzgâr sesini azaltır, sessiz kabin ortamı sunar. [9]

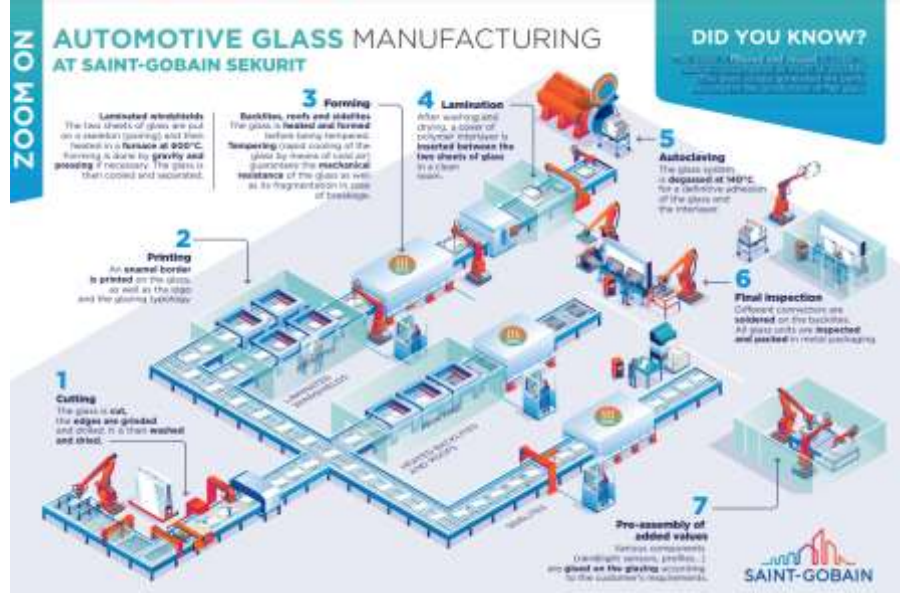
Tablo 1’de otomotiv camlarının araç performansı üzerindeki etkileri özetlenmiştir. Özellikle lamine ön cam uygulamaları gövde torsiyon rijitliğini artırarak çarpışma performansına katkı sağlamakta; optik özellikler ise sürücünün görüş kalitesini ve tepki süresini doğrudan etkilemektedir. Ayrıca ADAS sistemlerinin sağlıklı çalışabilmesi için kamera ve sensör uyumlu cam yapıları büyük önem taşımaktadır. Akustik PVB uygulamaları ise NVH performansını geliştirerek kabin içerisindeki gürültüyü azaltmaktadır (Keller, t.y.; SAE International, t.y.).

3- Üretim ve Montaj Süreçleri

Otomotiv camlarının üretiminde float cam üretimi, laminasyon ve temperleme gibi ileri üretim yöntemleri kullanılmaktadır. Üretim sonrasında gerçekleştirilen yapıştırıcı uygulamaları ve kürlenme kontrolleri, camın araç gövdesine güvenli şekilde montajlanmasını sağlamaktadır. Özellikle yapıştırma kalitesi, çarpışma performansı ve uzun dönem dayanıklılık açısından kritik öneme sahiptir (Pilkington, t.y.; Saint-Gobain Sekurit, t.y.)

Şekil 3’te Saint-Gobain Sekurit tarafından kullanılan otomotiv camı üretim prosesi gösterilmektedir. Süreç; cam kesme, baskı uygulaması, şekillendirme, laminasyon, otoklav işlemi, final kalite kontrolü ve ön montaj aşamalarından oluşmaktadır. İlk aşamada cam levhalar kesilmekte, kenar taşlama ve yıkama işlemleri uygulanmaktadır. Ardından serigrafî baskı işlemi gerçekleştirilmekte ve camlar yüksek sıcaklık altında şekillendirilmektedir. Laminasyon aşamasında cam tabakaları arasına PVB ara katmanı yerleştirilirken, otoklav prosesi ile cam ve ara katman arasında güçlü yapışma sağlanmaktadır. Son aşamalarda ise kalite kontrolleri ve araç entegrasyonu için gerekli ek parçaların montajı yapılmaktadır.

Bu üretim süreci; optik kalite, mekanik dayanım, güvenlik performansı ve uzun dönem dayanıklılık açısından kritik öneme sahiptir (Saint-Gobain Sekurit, t.y.).



Şekil 3- Saint-Gobain Sekurit otomotiv camı üretim proses aşamalarının şematik gösterimi (Saint-Gobain Sekurit, t.y.).

4- Test ve Validasyon Süreçleri

Otomotiv camlarının güvenlik ve dayanıklılık performanslarını doğrulamak amacıyla darbe testleri, optik kalite testleri, iklimsel yaşlandırma testleri, yapışma testleri ve ball impact testleri uygulanmaktadır. Bu testler, camların hem mekanik dayanımını hem de uzun süreli çevresel koşullara karşı performansını değerlendirmek için kullanılmaktadır (ISO 3537, t.y.; ECE R43, t.y.).

SONUÇ

Otomotiv camları yalnızca görüş sağlayan şeffaf yüzeyler değil, aynı zamanda araç güvenliği, yapısal dayanım, sürüş konforu ve gelişmiş sürücü destek sistemlerinin performansı açısından kritik mühendislik bileşenleridir. Özellikle lamine cam teknolojisi, kırılma sonrasında parçaları bir arada tutabilmesi sayesinde yolcu yaralanmalarını ve araç dışına fırlama riskini önemli ölçüde azaltarak modern otomotiv güvenlik yaklaşımının temel unsurlarından biri haline gelmiştir. Temperli camlar ise yüksek dayanım özellikleri ve kontrollü kırılma davranışları sayesinde yan ve arka cam uygulamalarında yaygın olarak tercih edilmektedir.

Optik kalite parametreleri olan distorsiyon, parlama ve ışık geçirgenliği sürücünün görüş performansını doğrudan etkilerken; ADAS sistemlerinin yaygınlaşmasıyla birlikte kamera ve sensör uyumluluğu da otomotiv camlarında kritik bir gereksinim haline gelmiştir. Özellikle otonom sürüş teknolojilerinin gelişmesiyle birlikte cam yüzeylerinin sensör doğruluğunu destekleyen yüksek optik kalite standartlarını karşılaması zorunlu hale gelmektedir.

Bunun yanında akustik PVB teknolojileri sayesinde otomotiv camları yalnızca güvenlik değil, aynı zamanda NVH performansı açısından da önemli katkılar sağlamaktadır. Yol ve rüzgâr gürültüsünün azaltılması sürüş konforunu artırırken sürücü yorgunluğunu azaltarak dolaylı şekilde güvenliği desteklemektedir.

Üretim süreçlerinde uygulanan laminasyon, temperleme, kenar işleme, yapıştırma ve kürlenme operasyonlarının doğru şekilde kontrol edilmesi uzun dönem dayanıklılık ve güvenlik performansı açısından büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle darbe testleri, optik kalite testleri, iklimsel yaşlandırma testleri ve yapışma testleri gibi validasyon süreçleri otomotiv camlarının güvenilirliğinin doğrulanmasında kritik rol oynamaktadır.

Gelecekte akıllı cam teknolojileri, entegre ekran sistemleri, güneş kontrol kaplamaları ve sensör destekli glazing çözümleri ile otomotiv camlarının araç güvenliği ve kullanıcı deneyimi üzerindeki etkisinin daha da artması beklenmektedir. Bu nedenle otomotiv cam teknolojileri, geleceğin bağlantılı, elektrikli ve otonom araç mimarilerinin en önemli mühendislik alanlarından biri olmaya devam edecektir.

KAYNAKÇA

[AGC Automotive](#). (t.y.). *Automotive glass technologies*. Erişim tarihi: 21 Mayıs 2026.

Bhise, V. D., & Allen, J. A. (2003). *Human factors in automotive engineering and technology*. CRC Press.

ECE Regulation No. 43. (t.y.). *Uniform provisions concerning the approval of safety glazing materials*. United Nations Economic Commission for Europe.

[ISO](#). (t.y.). *ISO 3537 road vehicles safety glazing materials test methods*. International Organization for Standardization.

Keller, M. (2018). *Acoustic glazing technologies and NVH performance in modern vehicles*. SAE International.

[Pilkington Automotive](#). (t.y.). *Automotive glass manufacturing processes*. Erişim tarihi: 21 Mayıs 2026.

Robertson, T. (2021). *Smart glazing technologies for autonomous and connected vehicles*. Elsevier.

[SAE International](#). (t.y.). *ADAS and automotive glazing systems*. Erişim tarihi: 21 Mayıs 2026.

Saint-Gobain Sekurit. (t.y.). *Passenger safety and automotive glazing systems*. Erişim tarihi: 21 Mayıs 2026.

Weller, G., & Schlag, B. (2007). *Visual perception, glare and optical distortion in automotive driving conditions*. Springer.

Benchmarking OCR Paradigms for Document Understanding

Alaeddin Türkmen¹, Barış Bayram², Ahmet Çay³

¹E-mail: alaeddin.turkmen@hepsijet.com; Hepsijet, İstanbul / Türkiye.

²E-mail: baris.bayram@hepsijet.com; Hepsijet, İstanbul / Türkiye.

³E-mail: ahmet.cay@hepsijet.com; Hepsijet, İstanbul / Türkiye.

Özet

Bu çalışma, kurye işe giriş süreçlerinde kullanılan resmi belgelerden geçerlilik tarihlerinin otomatik olarak çıkarılması problemini ele almaktadır. Bu kapsamda, geleneksel OCR yaklaşımlarından CNN+LSTM tabanlı EasyOCR ve Transformer tabanlı SuryaOCR modelleri ile birlikte, Görsel Dil Modeli (VLM) tabanlı OlmOCR modeli karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Çalışmanın temel odağı, VLM mimarisine sahip OlmOCR'ın, farklı belge tipleri ve görüntü kaliteleri altında diğer modellere kıyasla performansının analiz edilmesidir. DeneySEL sonuçlar, OlmOCR modelinin işlem süresi (throughput) daha uzun olmasına rağmen, doğruluk ve genelleme kabiliyeti açısından belirgin şekilde daha yüksek başarı sağladığını göstermektedir. Ayrıca, EasyOCR ve SuryaOCR modellerinde manuel olarak uygulanması gereken 90°, 180° ve 270° görüntü döndürme işlemlerinin OlmOCR tarafından otomatik olarak gerçekleştirilmesi, modelin pratik kullanım açısından önemli bir avantaj sunduğunu ortaya koymaktadır. Elde edilen bulgular, VLM tabanlı yaklaşımların belge anlama ve bilgi çıkarımı görevlerinde geleneksel OCR yöntemlerine güçlü bir alternatif olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Optik Karakter Tanıma, Görsel Dil Modelleri, Model Karşılaştırması, Belge Anlama

Abstract

This study addresses the problem of automatically extracting validity dates from official documents used in courier onboarding processes. In this context, traditional OCR approaches, including CNN+LSTM-based EasyOCR and Transformer-based SuryaOCR, are comparatively evaluated alongside a Vision-Language Model (VLM)-based approach, OlmOCR. The primary focus of the study is to analyze the performance of OlmOCR against other models across various document types and image qualities. Experimental results demonstrate that although OlmOCR has a longer throughput time, it significantly outperforms the other models in terms of accuracy and generalization capability. Furthermore, while EasyOCR and SuryaOCR require manual image rotation operations (90°, 180°, and 270°) as a preprocessing step, OlmOCR inherently handles such transformations automatically, providing a notable advantage in practical applications. The findings highlight that VLM-based approaches present a strong alternative to conventional OCR methods for document understanding and information extraction tasks.

Keywords: Optical Character Recognition (OCR), Vision-Language Models (VLM), Model Benchmarking, Document Understanding

INTRODUCTION

The rapid digitalization of business processes has significantly increased the demand for automated document processing systems across various industries. In logistics and courier services, onboarding procedures for new couriers typically require the submission and verification of multiple official documents containing critical information such as identity details, expiration dates, and validity periods. Traditionally, these processes are performed manually, resulting in increased operational costs, longer processing times, and a higher probability of human error. Consequently, automatic information extraction from document images has become an important research topic in the fields of Optical Character Recognition (OCR) and document intelligence.

Conventional OCR systems have been widely utilized for text extraction tasks due to their efficiency and relatively low computational requirements. Earlier approaches primarily relied on convolutional neural network (CNN) architectures combined with recurrent layers such as Long Short-Term Memory (LSTM) networks for sequence recognition, as commonly used in traditional OCR systems such as EasyOCR [1]. These methods demonstrated strong performance on structured and high-quality documents; however, they often struggle when processing real-world document images containing rotation, perspective distortion, varying illumination, low resolution, or complex layouts. More recently, Transformer-based OCR architectures have been introduced to address some of these limitations by improving contextual understanding and sequence modeling capabilities [2].

Despite these advancements, traditional OCR systems still face challenges in document understanding tasks that require semantic interpretation beyond plain text recognition. In practical applications, preprocessing operations such as image rotation correction are frequently required to improve recognition performance. These additional preprocessing steps increase system complexity and may reduce scalability in large-scale industrial environments.

Recent developments in Vision-Language Models (VLMs) have introduced a new paradigm for document understanding by jointly modeling visual and textual information. Unlike conventional OCR approaches that focus primarily on character recognition, VLM-based systems are capable of interpreting document context, layout structure, and semantic relationships simultaneously [3]. This capability makes them particularly promising for complex information extraction tasks from heterogeneous and real-world document images.

In this study, a comparative evaluation of CNN+LSTM-based, Transformer-based, and VLM-based OCR approaches is conducted for the task of extracting validity dates from courier onboarding documents. The analysis focuses on recognition accuracy, robustness against rotated document images, preprocessing requirements, and computational efficiency. Experimental findings demonstrate that VLM-based approaches achieve substantially higher extraction performance compared to conventional OCR methods, particularly in challenging document conditions. Furthermore, the ability of VLM-based systems to automatically handle rotated images without explicit preprocessing presents a significant practical advantage for real-world deployment scenarios.

The contributions of this study can be summarized as follows:

1. A comparative evaluation of different OCR paradigms for validity date extraction from real-world courier onboarding documents is presented.
2. The robustness of VLM-based document understanding approaches against rotated and heterogeneous document images is analyzed.

3. The trade-off between extraction accuracy and throughput performance across different OCR architectures is investigated.
4. The study highlights the practical advantages of integrating VLM-based approaches into industrial document processing pipelines.

METHOD

This study evaluates different OCR paradigms for the task of extracting validity dates from official documents used in courier onboarding processes. The dataset consists of real-world document images collected during operational workflows and includes various document types such as identification cards, driver licenses, certificates, and other official forms containing expiration or validity date information. Since the images were captured under uncontrolled conditions using mobile devices, the dataset includes substantial variability in image quality, illumination, background noise, viewing angle, and document orientation. In particular, a considerable number of documents are rotated by 90°, 180°, or 270°, creating additional challenges for OCR systems and making the dataset suitable for robustness evaluation under realistic conditions.

Three different OCR approaches were comparatively analyzed in this study. The first approach is a conventional OCR architecture based on Convolutional Neural Networks (CNNs) combined with Long Short-Term Memory (LSTM) layers. In this architecture, CNN layers are responsible for visual feature extraction, while LSTM layers perform sequential text recognition. The second approach is based on a Transformer architecture that utilizes self-attention mechanisms to improve contextual understanding and sequence modeling capabilities. Compared to recurrent architectures, Transformer-based OCR systems generally provide stronger performance on noisy and complex document images. The third approach employs a Vision-Language Model (VLM)-based OCR system that jointly processes visual and textual information to perform document understanding at a semantic level rather than relying solely on character recognition. This architecture enables the model to interpret both textual content and document structure simultaneously.

Before inference, all document images were resized and normalized to ensure consistency across experiments. However, additional preprocessing operations were required for the CNN+LSTM-based and Transformer-based OCR models due to their sensitivity to document orientation. To improve recognition performance, each document image was manually rotated by 90°, 180°, and 270°, and separate OCR inference was performed on every rotated version. The outputs obtained from different rotations were then evaluated to determine the correct validity date prediction. In contrast, the VLM-based OCR approach inherently handled rotated document images without requiring any explicit orientation correction or rotation preprocessing. The ability to directly process original document images significantly simplified the inference pipeline and reduced preprocessing complexity.

The primary objective of the study is the extraction of validity dates from document images. Each OCR model generates textual outputs from the input images, after which date information is identified using rule-based and pattern-matching techniques. The extracted dates are subsequently compared with manually verified ground-truth annotations to evaluate model performance. The evaluation process focuses not only on exact text recognition accuracy but also on the capability of each model to correctly identify semantically relevant date information under challenging real-world conditions.

Performance evaluation was conducted using both accuracy-oriented and efficiency-oriented metrics. Extraction accuracy was measured based on the correctness of the predicted validity dates compared to ground-truth labels. In addition, throughput performance was analyzed to assess inference efficiency.

and computational cost. The evaluation also considered robustness against rotated document images and dependency on preprocessing operations. This comprehensive analysis enables a detailed comparison between traditional OCR pipelines and modern Vision-Language-based document understanding systems in practical industrial scenarios.

RESULTS

Experimental results demonstrate significant performance differences among the evaluated OCR approaches in terms of extraction accuracy, robustness, and preprocessing dependency. The CNN+LSTM-based OCR model achieved an overall validity date extraction accuracy of 78.4% on the test dataset. Although the model performed adequately on high-quality and properly aligned document images, its performance degraded considerably in cases involving rotated documents, low-resolution images, and complex backgrounds. The requirement for multiple manual image rotations during preprocessing also increased the overall computational workload and inference complexity.

The Transformer-based OCR approach improved the overall extraction accuracy to 86.7%, outperforming the CNN+LSTM architecture in most challenging scenarios. The self-attention mechanism enabled better contextual understanding and improved robustness against noise and partial distortions. However, similar to the CNN+LSTM-based approach, the Transformer-based model still required explicit preprocessing operations for rotated images. In particular, document images rotated by 90° and 270° continued to negatively affect extraction consistency when preprocessing was not applied.

The VLM-based OCR approach achieved the highest overall extraction accuracy with a score of 96.3%. The model demonstrated substantially stronger robustness against heterogeneous document structures, illumination differences, perspective distortions, and rotated document images. Unlike the other OCR approaches, the VLM-based model successfully processed rotated images directly without requiring manual rotation correction. This capability significantly simplified the preprocessing pipeline and improved operational usability in real-world deployment scenarios.

A detailed analysis of rotated document images further highlighted the differences between the evaluated methods. On rotated samples, the CNN+LSTM-based OCR model achieved 61.2% accuracy, while the Transformer-based OCR model reached 74.8%. In comparison, the VLM-based approach maintained a significantly higher performance of 94.1% without any explicit rotation preprocessing. These findings indicate that semantic document understanding capabilities provided by Vision-Language architectures substantially improve robustness under challenging image conditions.

In terms of computational efficiency, traditional OCR models demonstrated faster inference performance compared to the VLM-based approach. The average throughput time per document was measured as 0.18 seconds for the CNN+LSTM-based model and 0.31 seconds for the Transformer-based model. The VLM-based OCR system required an average inference time of 1.42 seconds per document due to its larger architecture and multimodal processing capabilities. Although the VLM-based approach exhibited higher computational cost and lower throughput efficiency, the substantial improvement in extraction accuracy and reduction in preprocessing requirements compensated for this limitation in practical applications.

The experimental findings suggest that conventional OCR systems remain advantageous in scenarios prioritizing low latency and lightweight deployment. However, for real-world document understanding tasks involving heterogeneous document structures and uncontrolled image acquisition conditions, Vision-Language-based OCR approaches provide significantly superior extraction performance and operational robustness. The ability to automatically handle rotated document images without additional

preprocessing further strengthens the applicability of VLM-based systems in industrial document processing pipelines.

CONCLUSION AND DISCUSSION

This study presented a comparative evaluation of CNN+LSTM-based, Transformer-based, and Vision-Language Model (VLM)-based OCR approaches for extracting validity dates from official courier onboarding documents. The experimental findings demonstrated that the VLM-based approach significantly outperformed conventional OCR systems in terms of extraction accuracy, robustness against rotated document images, and adaptability to real-world document conditions. Although traditional OCR models achieved faster inference times, their dependency on preprocessing operations and sensitivity to image orientation limited their effectiveness in practical deployment scenarios.

The CNN+LSTM-based OCR model showed acceptable performance on clean and properly aligned document images; however, its performance deteriorated considerably under challenging conditions such as rotation, perspective distortion, and low image quality. The Transformer-based OCR approach improved contextual understanding and achieved higher extraction accuracy compared to recurrent architectures, yet it still required explicit preprocessing for rotated images. In contrast, the VLM-based system demonstrated strong semantic understanding capabilities and maintained high extraction performance even without orientation correction or manual preprocessing operations.

One of the most significant findings of this study is the practical advantage provided by the inherent rotation robustness of Vision-Language architectures. In traditional OCR pipelines, additional preprocessing stages such as image rotation correction increase both engineering complexity and computational overhead. Eliminating these preprocessing requirements simplifies industrial deployment pipelines and improves operational scalability. This characteristic is particularly important in mobile document acquisition environments where image orientation cannot be controlled reliably.

Despite its superior extraction performance, the VLM-based approach exhibited higher computational cost and longer throughput time compared to conventional OCR systems. This trade-off between accuracy and efficiency represents an important consideration for large-scale production environments. In scenarios where low latency is critical, lightweight OCR architectures may still remain preferable. However, for document understanding tasks involving heterogeneous layouts, noisy images, and uncontrolled acquisition conditions, the improved robustness and semantic comprehension capabilities of VLM-based systems provide substantial advantages.

The findings of this study suggest that Vision-Language-based document understanding approaches represent a promising direction for next-generation OCR systems. Beyond character recognition, these models enable contextual and semantic interpretation of document content, allowing more reliable information extraction from complex real-world documents. Future work may focus on improving the inference efficiency of VLM-based architectures, reducing computational requirements, and evaluating their performance on larger and more diverse document datasets. Additionally, integrating lightweight multimodal architectures and domain-specific fine-tuning strategies may further improve both scalability and real-time applicability in industrial document processing systems.

REFERENCES

[1] JaidedAI, “EasyOCR,” GitHub Repository, 2024. [Online]. Available: <https://github.com/JaidedAI/EasyOCR>

[2] V. Paruchuri and Datalab Team, “Surya: A Lightweight Document OCR and Analysis Toolkit,” GitHub Repository, 2025. [Online]. Available: <https://github.com/datalab-to/surya>

[3] J. Poznanski, J. Borchardt, J. Dunkelberger, R. Huff, D. Lin, A. Rangapur, C. Wilhelm, K. Lo, and L. Soldaini, “olmOCR: Unlocking Trillions of Tokens in PDFs with Vision Language Models,” arXiv preprint arXiv:2502.18443, 2025.

Aısı 304 Hammaddesinde Farklı Parametre Ve Kaynak Telleri Kullanılarak Yapılan Kaynak İşleminin Mekanik Özelliklere Etkisinin İncelenmesi

Zeki KAYA¹, Serkan APAY²

¹E-mail: zekiikkaya@gmail.com; Düzce Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Makine Mühendisliği Bölümü, Düzce / Türkiye.

²E-mail: serkanapay@duzce.edu.tr; Düzce Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Makine Mühendisliği Bölümü, Düzce/ Türkiye.

Özet

AISI 304, paslanmaz çelik ailesine ait olup en yaygın kullanılan östenitik paslanmaz çelik türlerinden biridir. Paslanmaz çelikler; üstün korozyon dirençleri, yüksek dayanımları ve geri dönüştürülebilirlik özelliklerine sahiptir. Paslanmaz çeliklerde kaynak işlemi, malzemenin korozyon direncini ve mekanik özelliklerini mümkün olduğunca koruyarak iki veya daha fazla parçanın birleştirilmesini sağlayan temel bir imalat yöntemidir. Ancak kaynak sırasında uygulanan parametreler ve dolgu metali türü gibi faktörler, kaynak metalinin ve ısı tesiri altındaki bölgenin (ITAB) mikro yapısını ve mekanik özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Bu çalışmada, iki adet AISI 304 Ø50 boru, ER308LSi ve ER316LSi dolgu telleri kullanılarak robotik MIG kaynak yöntemi ile birleştirilmiştir. Kaynak işlemleri 40 cm/dk ve 50 cm/dk ilerleme hızlarında ve 65 A ve 75 A akım değerlerinde, sabit diğer parametreler altında gerçekleştirilmiştir. Kaynak işlemi sonrasında elde edilen numuneler sertlik testi ve mikro yapı incelenmesi için uygun hale getirilmiş ve testleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, görseller ve bilimsel veriler kullanılarak çalışmanın içeriğinde açıklanmıştır.

Anahtar Kelimeler: AISI 304 Boru Kaynağı, Dolgu Malzemesinin Kaynağa Etkisi, Kaynak Parametrelerinin Kaynağa Etkisi, Robotik MIG Kaynak Yöntemi

Abstract

AISI 304, belonging to the stainless steel family, is one of the most widely utilized austenitic stainless steel grades. Stainless steels are characterized by their superior corrosion resistance, high strength, and recyclability. Welding of these materials is a fundamental manufacturing method that joins components while preserving their corrosion resistance and mechanical properties. However, factors such as welding parameters and filler metal types directly influence the microstructure and mechanical behavior of both the weld metal and the heat-affected zone (HAZ). In this study, two AISI 304 $\varnothing$ 50 pipes were joined via robotic MIG welding using ER308LSi and ER316LSi filler wires. Operations were executed at travel speeds of 40 and 50 cm/min, and currents of 65 and 75 A, under constant parameters. Post-weld specimens were prepared for hardness testing and

microstructural characterization, with the comprehensive results analyzed through visuals and scientific data.

Keywords: AISI 304 Pipe Welding, Effect of Filler Material on Welding, Effect of Welding Parameters on the Weld, Robotic MIG Welding Method

GİRİŞ

Kaynak işlemi iki veya daha fazla metal veya termoplastik malzemenin ısı, basınç ya da her iki etkinin birlikte uygulanmasıyla birleştirilmesini sağlayan bir imalat yöntemidir. Kaynak işlemi birleştirilecek malzemenin türü, kalınlığı, kullanım amacı ve çevresel faktörle göre değişir. En çok kullanılan yöntemlerden birisi gaz metal ark kaynağıdır (Kah, P., & Martikainen, J. 2013).

Paslanmaz çelikler sağladıkları yüksek mekanik dayanım ve yüksek korozyon direnci sayesinde günümüz endüstriyel uygulamalarında kullanım oranı oldukça fazladır. Dünyada östenitik paslanmaz çeliklerin üretim payı %70 olup aralarında AISI 304 kalite östenitik paslanmaz çelik türü küresel tüketimin en çok kullanılanı olmaktadır (Türkyılmazoğlu, A. 2006). Paslanmaz çelikler iyi kaynaklanabilirliğe sahip malzemelerdir. Kaynak verimliliğini artırmak için genellikle tunsten inert gas (TIG) ve metal inert gas (MIG) yöntemleri kullanılır. (Wang, Q., & Wu, X. 2025).

MIG kaynağı, yüksek verimlilikle çalışması, düşük deformasyon oluşturması ve düzgün kaynak dikişinin elde edilmesi sağlaması ile bilinir. MIG kaynak yöntemi ile ince yapıya sahip malzemenin kaynağı yapılabilir (Guo, H., Hu, J., & Tsai, H. L. 2009). Ayrıca kararlı ark yapısı, az sıçrama oluşumu, geniş uygulama alanı ve otomasyon sistemlerine kolay uyum sağlaması nedeniyle endüstride yaygın olarak tercih edilmektedir. MIG kaynağı, kaynak bölgesine sürekli olarak verilen koruyucu gazın altında elektrik arkı oluşturularak hem ana malzemenin hem de tel elektrodun eritilmesi ile oluşan kaynak banyosunun kaynatılacak bölgeye gezdirilmesi ve soğuma ile parçaların kalıcı olarak birleştirilmesi ile yapılır. Paslanmaz çeliklerin kaynak edilebilirliği üzerine yapılan incelemelerde, bu malzemelerin düşük karbonlu çeliklere kıyasla 4 ila 7 kat daha yüksek ısıl dirence sahip olduğu ve kaynak esnasında aşırı ısınma ile distorsiyonu önlemek amacıyla %20-25 oranında daha düşük akım şiddeti kullanılmasının zorunlu olduğu saptanmıştır. Ayrıca korozyon direncini korumak ve oksidasyonu engellemek adına soy gazların tercih edildiği MIG kaynak yönteminin, derin nüfuziyet, yüksek verimlilik ve sürekli kaynak kabiliyeti sayesinde endüstriyel uygulamalarda başarı sağladığı ortaya konmuştur (Karakaya, E., & fulin Köseoğlu, A. 2022). AISI 304 paslanmaz çelik kaynaklarında ER308L ve ER316L dolgu tellerinin kullanıldığı ve bu tellerin kaynak metalinin mikro yapısı, mekanik özellikleri ve korozyon davranışı üzerinde belirleyici etkiler oluşturduğu birçok deneysel çalışma ile ortaya konulmuştur (Rafiei & Mostaan, 2018; Chauhan et al., 2026; Ghosh, 2025).

MIG kaynağının insan yerine robotlar tarafından uygulanabilmesi aynı hareketleri sürekli aynı hassasiyetle yapacak olması var olabilecek insan hatalarını ortadan kaldırır ve standart kaynak kalitesi elde edilmesi sağlanır. Zor ve tehlikeli çalışma ortamlarından insanı uzak tutması, iş güvenliğini

artırarak operatör risklerini azaltır ve üretim sürecinin daha güvenli yürütülmesini sağlar. Robot kaynak uygulaması yüksek üretim hızı ile seri üretimlerde oldukça büyük avantaj sağlar. İlk yatırım maliyeti yüksek olsa da uzun vadede maliyet avantajı sağlar.

Deneyssel çalışmalar, dolgu teli seçiminin yalnızca kaynaklı birleşmenin mekanik dayanımını değil, aynı zamanda kaynak metalinin mikro yapısal karakteristiğini ve servis performansını da önemli ölçüde etkilediğini ortaya koymaktadır (Hassan et al., 2023). Bu nedenle uygun dolgu teli seçimi, kaynaklı yapıların uzun ömürlü, güvenilir ve servis koşullarına dayanıklı olması açısından kritik bir tasarım parametresi olarak değerlendirilmektedir. ER308L dolgu telinin, kimyasal bileşimi bakımından 304 paslanmaz çeliğe en yakın yapıya sahip olduğu ve bu nedenle kaynak metalinde uygun ferrit-östenit dengesini sağlayarak sıcak çatlak oluşum riskini azalttığı bildirilmektedir (Rafiei & Mostaan, 2018). ER316L dolgu teli ise içerdiği molibden (Mo) elementi sayesinde özellikle klorür içeren agresif ortamlarda daha yüksek korozyon direnci göstermektedir (Ghosh, 2025).

Kaynak işlemlerinde kullanılan parametreler, kaynaklı birleşmenin geometrisi, mikro yapısı ve mekanik özellikleri üzerinde belirleyici etkiye sahiptir. Bu parametreler arasında özellikle akım (amper), voltaj, kaynak hızı ve ısı girdisi, kaynak kalitesini doğrudan etkileyen temel değişkenler olarak değerlendirilmektedir.

Akım değeri, kaynak banyosuna aktarılan ısı miktarını kontrol eden en önemli parametrelerden biridir. Akımın artmasıyla birlikte nüfuziyet derinliği ve ergime miktarı artmakta, ancak aşırı akım kullanımı tane büyümesine ve istenmeyen mikro yapısal bozulmalara yol açabilmektedir (Hassan et al., 2023). Voltaj değeri ise ark uzunluğunu etkileyerek kaynak banyosunun genişliğini ve ark stabilitesini belirlemektedir.

Kaynak hızı, birim uzunluk başına düşen ısı girdisini doğrudan etkileyen bir parametredir. Düşük kaynak hızlarında ısı girdisi artarak daha geniş kaynak dikişi oluşurken, yüksek hızlarda yetersiz ergime ve nüfuziyet problemleri ortaya çıkabilmektedir. Bu nedenle optimum kaynak hızının seçimi, hem mekanik özelliklerin hem de mikro yapısal bütünlüğün sağlanması açısından kritik öneme sahiptir.

Toplam ısı girdisi, akım, voltaj ve kaynak hızının birleşimi ile oluşmakta olup, kaynak bölgesindeki tane yapısı, ferrit oluşumu ve artık gerilmeler üzerinde belirleyici rol oynamaktadır. Literatürde, uygun ısı girdisi kontrolünün özellikle östenitik paslanmaz çeliklerde sıcak çatlak oluşum riskini azalttığı ve kaynak kalitesini iyileştirdiği belirtilmektedir (Ghosh, 2025). Bu nedenle kaynak parametrelerinin doğru seçimi, yalnızca mekanik dayanımı değil aynı zamanda mikro yapısal kararlılığı ve servis performansını da etkileyen önemli bir mühendislik tasarım kriteri olarak kabul edilmektedir. Uygun ilave metal ve kaynak parametreleri seçildiğinde, östenitik paslanmaz çeliklerin birleştirilmesinde ana metale yakın, hatta ana metalden daha yüksek mekanik performansa sahip bağlantılar elde edilebilmektedir (Kahraman, N., Gülenç, B., & Akça, H. 2002). İstatistiki analizlere göre çekme dayanımı üzerinde en belirleyici faktör %48,71 katkı ile tel sürme hızı (ardından %25,3 ark voltajı) iken, mikro sertlik üzerinde %57,94 oranıyla en baskın parametre kaynak voltajıdır (Jebbur, A. M., AlKareem, S. S. A., & Mustafa, F. F. 2022).

Paslanmaz çeliklerin kaynaklanma prosesinde dolgu teli seçimi ve kaynak parametreleri, yalnızca kaynaklı birleşmenin mekanik özelliklerini değil, aynı zamanda üretim maliyetini ve proses verimliliğini de doğrudan etkileyen kritik faktörlerdir. ER308L ve ER316L gibi yaygın olarak kullanılan dolgu telleri arasında hem kimyasal bileşim hem de üretim maliyeti açısından belirgin farklılıklar bulunmaktadır. Bu farklılıklar, özellikle seri üretim gerçekleştirilen endüstriyel uygulamalarda toplam üretim maliyeti ve proses optimizasyonu üzerinde önemli bir etkiye sahiptir.

Günümüzde kaynak işlemlerinin robotik sistemler ile gerçekleştirilmesi, üretimde yüksek tekrarlanabilirlik ve standart kalite elde edilmesini sağlarken, insan kaynaklı hataları önemli ölçüde azaltmaktadır. Robotik Gas Metal Arc Welding sistemleri; yüksek üretim hızı, düşük hata oranı ve sürekli çalışma kabiliyeti sayesinde özellikle otomotiv ve seri üretim hatlarında yaygın olarak tercih edilmektedir. Kaynaklı bileşimlerin kalitesi, kullanılan kaynak parametreleri ve bağlantı geometrisine doğrudan bağlıdır. Akım, gerilim, kaynak hızı, koruyucu gaz ve elektrot özellikleri gibi proses değişkenleri, kaynak dikişi geometrisi ve nüfuziyet üzerinde belirleyici rol oynamaktadır (Pipavat, K. B., Pandya, D., & Patel, M. V. 2014).

Bu çalışma özelinde ise, paslanmaz çelik boru kaynaklı birleştirmeleri ele alınmakta olup, boru geometrisinin getirdiği ısı dağılımı, nüfuziyet kontrolü ve birleşim bütünlüğü gibi faktörler de ayrıca önem kazanmaktadır. Özellikle ince cidarlı boru yapılarında kaynak parametrelerinin ve dolgu teli seçiminin etkisi daha kritik hale gelmektedir.

Bu nedenle, farklı dolgu telleri arasındaki performans ve maliyet farklarının yanı sıra robotik boru kaynak uygulamalarında optimum kaynak parametrelerinin belirlenmesi, hem üretim verimliliğinin artırılması hem de kaynaklı boru birleşim kalitesinin iyileştirilmesi açısından kritik bir araştırma konusu olarak değerlendirilmektedir.

YÖNTEM

Kaynak işlemi için 2 adet Ø50 AISI 304 boru ve dolgu malzemesi olarak ER308L Si ve ER316L Si kullanılmıştır. Kullanılan malzemelerin kimyasal özellikleri aşağıda tablo 1, tablo 2 ve tablo 3’de verilmiştir.

Tablo 1. AISI 304 Paslanmaz Çelik Boru Kimyasal Bileşimi (Ağırlıkça%)

	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Fe (Demir)
AISI 304	0.054	1.67	0.036	0.03	0.38	18.25	9.45	Kalan

Tablo 2. ER308L Si Kaynak Telinin Kimyasal Özellikleri (Ağırlıkça%)

	C	Si	Mn	Cr	Ni	Fe (Demir)
ER308L Si	0.02	0.40	1.80	20.00	9.50	Kalan

Tablo 3. ER316L Si Kaynak Telinin Kimyasal Özellikleri (Ağırlıkça%)

	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Fe (Demir)
ER316L Si	0.02	0.40	1.80	18.50	12.00	2.70	Kalan

Kaynak işlemi şekil 1’de gösterilen OTC FD-B4L 6 eksenli robot kol ile şekil 2’de gösterilen iki boruyu sürekli aynı konuma sabitleyecek şekilde tasarlanan aparat, kaynak şasesine bağlanarak yapılmıştır



Şekil 6



Şekil 7

Robot kol için kullanılan aparatlar Ø0,8mm bakır robot kaynak ucu, nozul ve Ø0,8mm makaradır. Kaynak için argon gazı kullanılmıştır.

Kaynak işlemi amper ve kaynak hızı haricinde olan parametreleri sabit tutulması ile ER308L Si tablo 4’de ve ER316L Si tablo 5’de gösterilen parametrelerin kullanılmasıyla kaynatılmıştır. Örnek kaynak görseli şekil 3’de verilmiştir.

Tablo 4. ER308L Si Kaynak Parametreleri

	Amper (A)	Hız(cm/dk)	Gaz Debisi(lt/d)	Akım Türü
ER308L Si	75	40	12	DC-Pulse
	75	50	12	DC-Pulse
	65	40	12	DC-Pulse
	65	50	12	DC-Pulse

Tablo 5. ER316L Si Kaynak Parametreleri

	Amper (A)	Hız(cm/dk)	Gaz Debisi(lt/d)	Akım Türü
ER316L Si	75	40	12	DC-Pulse
	75	50	12	DC-Pulse
	65	40	12	DC-Pulse
	65	50	12	DC-Pulse



Şekil 8

Tablo 4 ve 5’de verilen parametrelere kaynatılan numunelerin tamamı şekil 6’da verilen bakalite alınmış ve sertlik testine tabi tutulması için hazır hale getirilmiştir.



Şekil 9

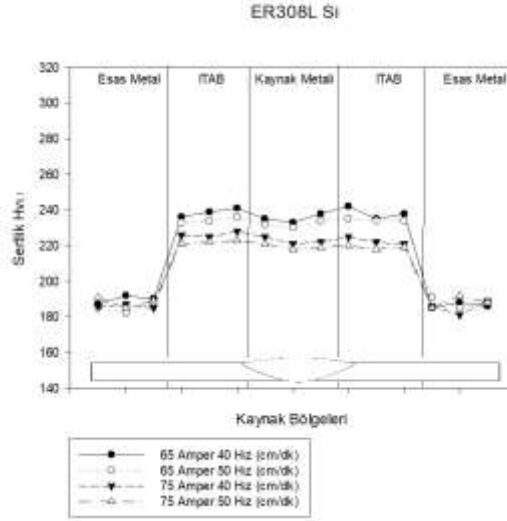
BULGULAR

Esas metalde ikizlenme çizgilerine sahip homojen ostenit taneleri gözlemlenirken, yüksek ısıya maruz kalan ITAB bölgesinde tane irileşmesi ve mikro yapısal geçiş sınırları belirlenmiştir; eriyip hızla katılaştıran kaynak metalinde ise yönelmiş hücresel-dendritik bir morfolojinin oluştuğu ve yapı içerisinde ağsı delta-ferrit fazının çökeldiği düşünülmektedir.

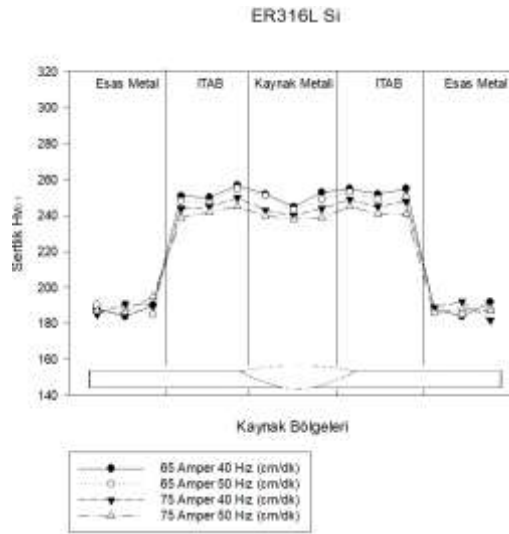


Şekil 10

Yapılan sertlik çalışmalarında esas metalden kaynak bölgesine doğru gidildiğinde sertliğin arttığı bu artışın ER316L Si dolgu telinde daha fazla olduğu görülmüştür. ER316L Si bileşimindeki Molibden (Mo) elementinin sağladığı katı çözelti sertleşmesi, ER308L Si’de görülen lokal dalgalanmaları baskılamış ve kaynak bölgesi genelinde daha homojen, kararlı ve sürekli bir sertlik platosu oluşturmuştur. Bu doğrultuda, robotik paslanmaz çelik kaynak uygulamalarında kararlı mekanik performans için 75 Amper serisi ana metal göre gösterdiği yakınlıktan optimum parametre grubu olarak öne çıkmaktadır.



Şekil 11



Şekil 12

Esas metalden kaynak bölgesine geçildiğinde sertlik değerleri 180 HV0.1 seviyelerinden 250 HV0.1 bandına yükselmiştir. Düşük ısı girdisi sunan 65 Amper parametresinde en yüksek sertlikler elde edilirken, yüksek ısı girdisine sahip 75 Amper parametresinde sertlik değerleri düşüş göstermiştir. Alaşım elementleri açısından ise ER316L Si ilave metali, ER308L Si'ye kıyasla daha yüksek ve homojen sertlik tepe değerleri sergilemiştir.

SONUÇ VE TARTIŞMA

Esas metalden kaynak bölgesine geçildiğinde sertlik değerleri 180 HV0.1 seviyelerinden 250 HV0.1 bandına yükselmiştir. Düşük ısı girdisi sunan 65 Amper parametresinde en yüksek sertlikler elde

edilirken, yüksek ısı girdisine sahip 75 Amper parametresinde sertlik değerleri düşüş göstermiştir. Alaşım elementleri açısından ise ER316L Si ilave metali, ER308L Si'ye kıyasla daha yüksek ve homojen sertlik tepe değerleri sergilemiştir.

- Esas metalde 180-190 HV0.1 seviyesinde olan sertlik, ITAB ve kaynak metali bölgelerine geçildiğinde belirgin şekilde artarak 220-250 HV0.1 bandına ulaşmaktadır.
- Düşük akım değerinde (65 Amper) en yüksek sertlik değerleri elde edilirken, akım 75 Amper'e yükseldiğinde tüm bölgelerdeki sertlik değerleri aşağı yönlü seyretmektedir.
- Aynı amper değerleri altında, kaynak hızı değişimi sertlik profilinde dalgalanmalara yol açmakta ve kararlılığı doğrudan etkilemektedir.
- ER316L Si ilave metali, ER308L Si'ye kıyasla kaynak ve ITAB bölgelerinde daha yüksek ve daha homojen (dengeli) sertlik tepe değerleri sunmaktadır.

Robotik paslanmaz çelik kaynak uygulamalarında yüksek ve kararlı bir mekanik performans elde etmek adına, alaşım elementleri açısından zengin olan ER316L Si ilave metalinin tercih edilmesi öngörülmektedir. Yapıdaki Molibden (Mo) elementinin sağladığı katı çözelti sertleşmesi, ER308L Si dolgu telinde görülen lokal sertlik dalgalanmalarını baskılamakta ve kaynak bölgesi genelinde daha homojen bir sertlik platosu oluşturmaktadır. İşlem parametreleri açısından ise, düşük ısı girdisine (65 Amper) kıyasla sertlik yığılmalarını önleyen ve ana metal değerlerine daha yakın, dengeli bir profil sergileyen 75 Amper akım serisinin optimum işlem parametresi olarak seçilmesi öngörülmektedir.

KAYNAKÇA

Wang, Q., & Wu, X. (2025). Fitting analysis and optimization of MIG welding current for stainless steel. China Welding, 100013.

Chauhan, K. S., Diwakar, V., Vashista, M., Srivastava, B. K., & Khan Yusufzai, M. Z. (2026). Microstructural and mechanical evaluation of a dissimilar gas metal arc-welded AISI 304/AISI 409M Joint using ER308L filler. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering, 09544089261431064.

Ghosh, N. (2025). The effect of filler wires ER316L and ER310 on the tensile strength of tungsten inert gas AISI 304L weldments using the Grey-Taguchi methodology. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering, 09544089251347345.

Hassan, A., El-Mahallawi, I. E., & El-Koussy, M. R. (2023). Effect of GTAW welding current on the quality of 304L austenitic stainless steel using ER316L. International Journal of Materials Technology and Innovation, 3(2), 10-18.

Rafiei, M., & Mostaan, H. (2019). The effect of filler metal and butter layer on microstructural and mechanical properties of pure Cu to AISI304 stainless steel dissimilar joint. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications, 233(9), 1894-1905.

Pipavat, K. B., Pandya, D., & Patel, M. V. (2014). Optimization of mig welding process parameter using taguchi techniques. Optimization, 1(5).

Türkyılmazoğlu, A. (2006). Dupleks, martenzitik ve ferritik paslanmaz çeliklerin kaynağı (Master's thesis, Sakarya Üniversitesi (Turkey)).

Kah, P., & Martikainen, J. (2013). Influence of shielding gases in the welding of metals. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 64(9), 1411-1421.

Guo, H., Hu, J., & Tsai, H. L. (2009). Formation of weld crater in GMAW of aluminum alloys. International Journal of Heat and Mass Transfer, 52(23-24), 5533-5546.

Kahraman, N., Gülenç, B., & Akça, H. (2002). Ark kaynak yöntemi ile birleştirilen ostenitik paslanmaz çelik ile düşük karbonlu çeliğin mekanik özelliklerinin incelenmesi. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 17(2).

Jebbur, A. M., AlKareem, S. S. A., & Mustafa, F. F. (2022). Effect of MIG Welding Parameters on the Mechanical Properties of AISI 304 Austenitic Stainless Steels. Al-Khwarizmi Engineering Journal, 18(1), 1-15.

Karakaya, E., & fulin Köseoğlu, A. (2022). Paslanmaz Çeliklerin Farklı Akımlarda MIG Kaynak Yöntemiyle Birleştirilmesinin İncelenmesi. Manufacturing Technologies and Applications, 3(3), 31-43.

Doğal Kauçuk Esaslı Otomotiv Titreşim Önleyici Elemanlarda Vulkanizasyon Davranışının Değerlendirilmesi

Sinan DEVECİ¹, Meral AKKOYUN KURLU²

1E-mail: sinandevicii@outlook.com; Angst+Pfister Advanced Technical Solutions, Bursa / Türkiye.

2E-mail: meral.akkoyun@btu.edu.tr; Bursa Teknik Üniversitesi, Polimer Malzeme Mühendisliği Bölümü, Bursa / Türkiye.

Özet

Bu çalışma, doğal kauçuk esaslı otomotiv titreşim önleyici bir elemanda vulkanizasyon sürecinin kür dağılımı ve nihai performans üzerindeki etkisini değerlendirmektedir. Kauçuk-metal bağlı parçalarda geometri, kesit kalınlığı ve ara yüzey koşulları nedeniyle parça hacmi boyunca farklı kür seviyeleri oluşabilmektedir. Bu kapsamda doğal kauçuk bileşiğinin termal ve reolojik davranışı diferansiyel taramalı kalorimetri ve hareketli kalıp reometresi analizleriyle tanımlanmış, veriler sonlu elemanlar yöntemi tabanlı proses simülasyonuna aktarılmıştır. Farklı vulkanizasyon sürelerinde üretilen numuneler mekanik, dinamik, termal ve morfolojik yöntemlerle karakterize edilmiştir. Bulgular, optimum proses koşulunun yalnızca en yüksek kür derecesine göre değil, kür homojenliği, mekanik denge ve servis performansı birlikte dikkate alınarak belirlenmesi gerektiğini göstermiştir.

ssssAnahtar Kelimeler: Doğal kauçuk, kür homojenliği, sonlu elemanlar yöntemi, titreşim sönümleme, vulkanizasyon.

Abstract

This study evaluates the effect of vulcanization on cure distribution and final performance in a natural rubber-based automotive anti-vibration component. In rubber-metal bonded parts, product geometry, section thickness and interface conditions may cause different cure levels throughout the part volume. In this context, the thermal and rheological behavior of the natural rubber compound was characterized by differential scanning calorimetry and moving die rheometer analyses, and the obtained data were transferred to a finite element method-based process simulation. Samples produced at different vulcanization times were characterized by mechanical, dynamic, thermal and morphological methods. The findings showed that the optimum process condition should be determined not only according to the highest cure degree, but also by considering cure homogeneity, mechanical balance and service performance together.

Keywords: Cure homogeneity, finite element method, natural rubber, vibration damping, vulcanization.

GİRİŞ

Elastomer esaslı titreşim önleyici elemanlar, otomotiv sistemlerinde motor, şasi ve taşıyıcı yapı arasındaki dinamik yüklerin kontrol edilmesinde önemli görev üstlenmektedir. Bu parçalar yalnızca yük taşıyan pasif bileşenler değil, aynı zamanda titreşim iletimini azaltan ve konforu etkileyen fonksiyonel

malzemelerdir. Doğal kauçuk, yüksek elastik deformasyon kabiliyeti, yorulma dayanımı ve uygun sönümlendirme karakteri nedeniyle bu uygulamalarda yaygın biçimde tercih edilmektedir. Bununla birlikte doğal kauçuğun nihai davranışı, vulkanizasyon sırasında oluşan çapraz bağ ağının yoğunluğu ve homojenliği ile doğrudan ilişkilidir (Adduci et al., 2024; Park et al., 2024).

Kauçuk-metal bağlı otomotiv parçalarında geometri, kesit kalınlığı, metal insert varlığı ve kalıp ile temas koşulları nedeniyle sıcaklık dağılımı her bölgede aynı olmamaktadır. Bu durum, aynı nominal kalıp sıcaklığı ve süre altında parça merkezinde ve yüzey bölgelerinde farklı kür derecelerinin oluşmasına yol açabilmektedir. Yetersiz kürlenmiş bölgeler düşük rijitlik ve zayıf elastik geri kazanım eğilimi gösterirken, aşırı ilerlemiş ağ yapıları dinamik performans açısından her zaman avantaj sağlamamaktadır. Bu nedenle optimum proses koşulunun belirlenmesinde hacimsel kür dağılımı ve bu dağılımın deneysel performans karşılığı birlikte değerlendirilmelidir (Limrungruengrat et al., 2022; Lubura et al., 2023).

Bu çalışmanın amacı, doğal kauçuk esaslı bir otomotiv titreşim önleyici elemanda vulkanizasyon süresine bağlı olarak gelişen kür dağılımını sonlu elemanlar yöntemi tabanlı proses simülasyonu ile incelemek ve elde edilen sonuçları deneysel karakterizasyon verileriyle ilişkilendirmektir. Böylece üretim parametreleri ile nihai parça davranışı arasındaki ilişkinin daha kontrollü biçimde yorumlanması hedeflenmiştir.

YÖNTEM

Çalışmada doğal kauçuk esaslı bir elastomer reçetesi kullanılmıştır. Reçete; doğal kauçuk, karbon siyahı, yağ, aktivatör, stabilizan, hızlandırıcı ve kükürt bileşenlerinden oluşan, otomotiv titreşim önleyici parçalar için uygun elastikiyet, rijitlik ve sönümlendirme dengesini hedefleyen bir sistemdir. Metal-kauçuk ara yüzey bağlanmasını sağlamak amacıyla üretim öncesinde metal yüzeyler hazırlanmış ve uygun bağlayıcı sistem uygulanmıştır. Numuneler, proses simülasyonunda incelenen koşullarla uyumlu olacak şekilde aynı geometri ve aynı reçete altında üretilmiştir.

Malzemenin ısı ve reolojik davranışı diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC) ve hareketli kalıp reometresi (MDR) analizleri kullanılarak tanımlanmıştır. DSC verileri malzemenin sıcaklığa bağlı özgül ısı ve reaksiyon entalpisi davranışının belirlenmesinde; MDR verileri ise vulkanizasyon reaksiyonunun sıcaklıkla değişen ilerleme hızının tanımlanmasında kullanılmıştır. Bu veriler, sonlu elemanlar yöntemi tabanlı proses simülasyonuna aktarılmış ve kür reaksiyonunun termo-kimyasal gelişimi sayısal olarak modellenmiştir.

Simülasyonlar 150 °C kalıp sıcaklığında 6, 8 ve 10 dakikalık vulkanizasyon süreleri için gerçekleştirilmiş ve parça hacmi boyunca gelişen kür derecesi dağılımı karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Aynı proses koşullarında üretilen numuneler Shore A sertliği, statik yükleme, dinamik yükleme, kalıcı deformasyon, şişme temelli çapraz bağ yoğunluğu, termogravimetrik analiz, FT-IR ve SEM incelemeleri ile karakterize edilmiştir. Bu çoklu karakterizasyon yaklaşımı sayesinde sayısal modelden elde edilen kür dağılımı, malzemenin mekanik, dinamik, termal, kimyasal ve morfolojik davranışı ile birlikte değerlendirilmiştir.

BULGULAR

Simülasyon sonuçları, 6 dakikalık vulkanizasyon süresinde parça içinde belirgin bir kür gradyenti oluştuğunu göstermiştir. Vulkanizasyon sonunda merkez bölgede kür derecesi yaklaşık %31-33 seviyesinde kalırken, yüzeye yakın bölgelerde daha yüksek değerlere ulaşılmıştır. Oda sıcaklığında kondisyon sonrası bu numunede nihai kür derecesi artsa da dağılımın heterojen karakteri korunmuştur. 8 dakikalık koşulda kesit boyunca yaklaşık %85-87 aralığında daha dengeli bir nihai kür dağılımı elde edilmiş, 10 dakikalık koşulda ise daha yüksek kür derecesine ulaşılmıştır.

Deneysel sonuçlar bu yorumu desteklemektedir. Shore A sertliği 6, 8 ve 10 dakikalık numunelerde sırasıyla 48,8; 53,8 ve 50,7 olarak belirlenmiş, en yüksek yüzey sertliği 8 dakikalık koşulda elde edilmiştir. ± 5 mm statik yükleme altında en yüksek kuvvet değeri de 8 dakikalık numunede ölçülmüştür.

Dinamik testlerde her iki karakteristik frekansta en düşük $\tan\delta$ değerlerinin 8 dakikalık numunede elde edilmesi, bu koşulda enerji kaybı ve elastik geri kazanım dengesinin daha uygun olduğunu göstermiştir. Flory-Rehner şişme testi sonuçları, süre artışıyla çapraz bağ yoğunluğunun arttığını göstermiştir. Buna karşın en yüksek çapraz bağ yoğunluğuna sahip 10 dakikalık numunenin genel mekanik ve dinamik performansı 8 dakikalık numuneyi aşmamıştır. FT-IR sonuçları, tüm numunelerde aynı temel doğal kauçuk esaslı yapının korunduğunu; farklılıkların ana kimyasal iskelet değişiminden ziyade ağ yapısının gelişim düzeyi ve düzenliliği ile ilişkili olduğunu göstermiştir. TGA sonuçları, vulkanizasyon süresine bağlı olarak termal bozunma davranışında farklılıklar oluştuğunu ortaya koymuştur.

SEM incelemeleri kısa sürede daha boşluklu ve düzensiz bir morfoloji, optimum proses penceresinde daha homojen ve sürekli bir yapı, daha uzun sürede ise yer yer kompakt fakat daha düzensiz topografik özellikler bulunduğunu göstermiştir. Genel değerlendirmede, incelenen reçete ve geometri için optimum proses koşulunun maksimum kür derecesine karşılık gelen koşuldan ziyade, yeterli kürlenme, homojen ağ gelişimi, mekanik denge ve dinamik servis performansını birlikte sağlayan proses penceresi olduğu belirlenmiştir. Bu yaklaşım, simülasyon destekli ve deneysel olarak doğrulanmış bir optimizasyon stratejisinin kullanılabileceğini göstermektedir (Traintinger et al., 2024).

SONUÇ VE TARTIŞMA

Bu çalışmada doğal kauçuk esaslı bir otomotiv titreşim önleyici elemanda vulkanizasyon davranışı, sonlu elemanlar yöntemi tabanlı proses simülasyonu ve deneysel karakterizasyon sonuçları birlikte değerlendirilerek incelenmiştir. Sonuçlar, kısa vulkanizasyon süresinde parça içinde belirgin kür heterojenliği oluştuğunu ve bu durumun mekanik ile morfolojik davranışı olumsuz etkilediğini göstermiştir. Sürenin artırılması kür derecesini yükseltmekle birlikte, performansın her durumda doğrusal olarak iyileşmediği belirlenmiştir.

En uygun davranış; kür homojenliği, sertlik, rijitlik, dinamik enerji kaybı, kalıcı deformasyon ve morfolojik bütünlük açısından dengeli sonuç veren proses penceresinde elde edilmiştir. Bu nedenle elastomer esaslı titreşim önleyici elemanlarda optimum vulkanizasyon koşulu, yalnızca en yüksek kür derecesine göre değil, sayısal kür dağılımı ve deneysel servis performansı birlikte dikkate alınarak belirlenmelidir.

Gelecek çalışmalarda farklı kalıp sıcaklıkları, farklı kesit kalınlıkları ve farklı elastomer reçeteleri değerlendirilerek sıcaklık-süre-geometri etkileşimi daha geniş bir proses penceresinde incelenebilir. Ayrıca dinamik testlerin daha geniş frekans ve sıcaklık aralıklarında tekrarlanması, proses simülasyonu ile servis performansı arasındaki korelasyonun güçlendirilmesine katkı sağlayacaktır.

KAYNAKÇA

- Adduci, R., Vermaut, M., Perrelli, M., Cosco, F., Vanpaemel, S., Naets, F., & Mundo, D. (2024). A review of bushing modelling approaches for MultiBody simulations. *Mechanism and Machine Theory*, 191, 105496.
- Limrungruengrat, S., Chaikittiratana, A., Pornpeerakeat, S., & Chantrasmi, T. (2022). Thermo-mechanical finite element simulation and validation of rubber curing process. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 36, 3039-3046.
- Lubura, J., Kojić, P., Pavličević, J., Ikonić, B., Balaban, D., & Bera, O. (2023). A novel approach for simulation and optimization of rubber vulcanization. *Polymers*, 15(7), 1750.
- Park, S.-J., Park, B., Lee, J.-Y., Shin, Y.-H., Jeong, C.-L., Kim, S.-J., & Kim, K. (2024). Study on dynamic characteristics of resilient mount under preload. *Materials*, 17(20), 5096.
- Traintinger, M., Azevedo, M., Kerschbaumer, R. C., Lechner, B., & Lucyshyn, T. (2024). Optimization strategy for process design in rubber injection molding: A simulation-based approach allowing for the prediction of mechanical properties of vulcanizates. *Polymers*, 16(14), 2033.

E195 Hammaddesinde Farklı Parametre Ve Kaynak Telleri Kullanılarak Yapılan Kaynak İşleminin Mekanik Özelliklere Etkisinin İncelenmesi

Tahir ARAZ¹, Serkan APAY²

¹E-mail: tahiraraz123@gmail.com; Düzce Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Makine Mühendisliği Bölümü, Düzce / Türkiye.

²E-mail: serkanapay@duzce.edu.tr; Düzce Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Makine Mühendisliği Bölümü, Düzce/ Türkiye.

Özet

E195 hammaddesi, düşük karbonlu yapısal çeliklerin bir temsilcisi olarak, ekonomik maliyeti ve işlenebilirliği sayesinde inşaat, otomotiv ve imalat gibi birçok endüstriyel sektörde yaygın olarak tercih edilmektedir. Malzemenin kaynaklanabilirliği ve kaynak sonrası elde edilen mekanik özellikleri, malzemenin kullanım ömrü ve performansı açısından kritik öneme sahiptir. Özellikle, kaynak işlemleri sırasında kullanılan farklı parametreler (akım şiddeti ve ilerleme hızı) ve çeşitli kaynak dolgu tellerinin (ER70S-3, ER70S-6) etkileri, malzemenin mikro yapısını ve mekanik dayanımında belirgin farklılıklar yaratmaktadır. Ancak kaynak sırasında uygulanan parametreler, dolgu metali türü ve ısı girdisi gibi faktörler, kaynak metalinin ve ısı tesiri altındaki bölgenin (ITAB) mikro yapısını ve mekanik özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Bu çalışmada, E195 (Ø50 x 1,5 mm) düşük karbonlu çelik borular, ER70S-3 ve ER70S-6 dolgu telleri kullanılarak farklı akım (60, 70 A) ve ilerleme hızlarında (30, 40 cm/dk) robotik MAG yöntemiyle kaynaklanmıştır. Bu çalışma sonucunda ER70S-6 dolgu metalinin 70A 40 cm/dk hızlarda daha düşük sertlik değeri elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Dolgu Malzemesinin Kaynağa Etkisi, E195 Boru Kaynağı, Kaynak Parametrelerinin Etkisi, Mekanik Özellikler, Robotik MAG Kaynak Yöntemi

Abstract

Cost-effective and highly workable E195 low-carbon steel is widely used across various industries. Its post-weld mechanical properties and service life heavily depend on welding parameters—such as current, travel speed, and filler wire—which directly alter the microstructure and strength of both the weld and the heat-affected zone (HAZ). This study investigated these effects by applying robotic MAG welding to E195 steel tubes using ER70S-3 and ER70S-6 filler wires, with varying currents (60 A, 70 A) and travel speeds (30, 40 cm/min). The findings revealed that using the ER70S-6 filler wire at a 70 A current and 40 cm/min travel speed yielded the lowest hardness values.

Keywords: Effect of Filler Metal on the Weld, E195 Pipe Welding, , Effect of Welding Parameters, Mechanical Properties, Robotic MAG Welding Process

GİRİŞ

Kaynak, iki benzer malzemeyi (genellikle metal) çok yüksek ısı kullanarak eritip birbirine bağlama işlemidir. Bir yapıştırıcının aksine nesneleri sadece birbirine tutturmaz; metallerin uç kısımlarını elektrik akımı veya gaz aleviyle eriterek sıvılaştırır, genellikle bu bölgeye destekleyici bir dolgu malzemesi ekler ve soğumasını bekler. Soğuma gerçekleştiğinde ise tıpkı uçları eritilip birleştirilen iki çikolatanın donduğunda tek parça olması gibi, başlangıçtaki iki ayrı metal parçası birbirine kaynayarak sökülemez derecede sağlam, tek bir bütün haline gelir.

MIG kaynağının gelişimi, 1947 yılında ABD’de ilk ticari kaynak makinelerinin üretimiyle başlamıştır. O dönemde bu yöntem S.I.G.M.A (Shielded Inert Gas Metal Arc) olarak adlandırılmakta olup günümüzdeki MIG kaynağı ile aynı prensipte kullanılmaktaydı. Karbondioksitin koruyucu gaz olarak ilk kez 1952 yılında Rusya’da denenmesiyle birlikte MAG kaynağının temelleri atılmıştır. O yıllarda argon gazının maliyetinin yüksek olması nedeniyle bu yöntem, özellikle alaşımsız ve düşük alaşımlı çeliklerin kaynağında yaygınlaşmıştır (Anık, S., & Vural, M. 1993).

MAG kaynak işleminde, kullanılan ER70S serisi dolgu tellerindeki Mangan (Mn) ve Silisyum (Si) oranlarının yüksek olması, kaynak havuzunun deoksidasyon kabiliyetini artırarak kaynak dikişindeki gözenek (porozite) oluşumunu engeller ve mekanik bütünlüğü destekler (Lancaster, J. F. 1999).

Kaynak işleminde kullanılan dolgu telinin (örneğin ER70S-6 veya ER70S-2) alaşım yapısı ve uygulanan akım şiddeti, Isının Tesiri Altındaki Bölgede (ITAB) oluşacak mikroyapısal dönüşümleri ve dolayısıyla birleşme noktasının sertlik profillerini önemli ölçüde değiştirmektedir (Harman, M., Ada, H., & Çetinkaya, C. 2020).

E195 gibi düşük karbon eşdeğerine (CE) sahip yapı çeliklerinde genel kaynaklanabilirlik yüksek kabul edilse de; ince cidarlı uygulamalarda malzemenin hızlı soğuması ITAB sınırında lokal sertleşmelere neden olabilmekte, bu durum ancak ER70S-6 gibi doğru dolgu teli ve akım optimizasyonu ile minimize edilebilmektedir (Bailey, N. 1994).

Çeliklerinin MAG kaynağı sonrası uygulanan mekanik testleri, en yüksek sertlik değerlerinin genellikle hızlı soğumanın gerçekleştiği ITAB sınırında oluştuğunu ve uygulanan düşük akım parametrelerinin bu sertlik piklerini doğrudan yönettiğini göstermektedir (Palani, P. K., & Murugan, N. 2006).

Robotik kaynak uygulamalarında ısı girdisi ve torç ilerleme hızının tüm proses boyunca sabit tutulabilmesi, mikroyapısal faz dağılımının dikiş hattı boyunca homojen olmasını sağlayarak, yapı çeliklerinde mekanik zayıf noktaların (weak spots) oluşmasını büyük ölçüde engeller (Cornu, J. 2013).

Farklı dolgu telleri (ER70S-2, ER70S-3, ER70S-6) ve değişken akım parametreleri (60-70A) kullanılarak elde edilen mekanik test sonuçlarının istatistiksel olarak incelenmesi; hangi kaynak

değişkeninin nihai akma ve çekme dayanımı üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etki yarattığını belirlemek için endüstriyel araştırmalarda standart bir metottur (Montgomery, D. C. 2017).

YÖNTEM

Kaynak işlemi için 2 adet Ø50x1,5 E195 boru ve dolgu malzemesi olarak ER70S-3 ve ER70S-6 kullanılmıştır. Kullanılan malzemelerin kimyasal özellikleri aşağıda tablo 1, tablo 2 ve tablo 3’de verilmiştir.

Tablo 1. E195 Çelik Boru Kimyasal Bileşimi(Ağırlıkça%)

	C	Mn	Si	Fe (Demir)
E195	Max.0,15	Max0,7	Max0,35	Kalan

Tablo 2. ER70S-3 Kaynak Telinin Kimyasal Özellikleri(Ağırlıkça %)

	C	Mn	Si	Fe(Demir)
ER308L Si	0.06-0,15	0,9-1,4	0,45-075	Kalan

Tablo 3. ER70S-6 Kaynak Telinin Kimyasal Özellikleri(Ağırlıkça %)

	C	Mn	Si	Fe(Demir)
ER316L Si	0.06-0,15	1,4-1,85	0,8-1,15	Kalan

Kaynak işlemi şekil 1’de gösterilen OTC FD-B4L 6 eksenli robot kol ile şekil 2’de gösterilen iki boruyu sürekli aynı konuma sabitleyecek şekilde tasarlanan aparatın kaynak şasesine bağlanarak yapılmıştır



Şekil 13



Şekil 14

Robot kol için kullanılan aparatlar Ø1mm bakır robot kaynak ucu, nozul ve Ø1mm makaradır. Kaynak için %92 Argon %8 CO₂ gazı kullanılmıştır.

Kaynak işlemi amper ve kaynak hızı haricinde olan parametreleri sabit tutulması ile ER70S-6 tablo 4’de ve ER70S-3 tablo 5’de gösterilen parametrelerin kullanılmasıyla kaynatılmıştır. Örnek kaynak görseli şekil 3’de verilmiştir.

Tablo 4. ER70S-6 Kaynak Parametreleri

	Amper (A)	Hız(cm/dk)	Gaz Basıncı(lt/d)
ER70S-6	70	30	15
	70	40	15
	60	30	15
	60	40	15

Tablo 5. ER70S-3 Kaynak Parametreleri

	Amper (A)	Hız(cm/dk)	Gaz Basıncı(lt/d)
ER70S-3	70	30	15
	70	40	15
	60	30	15
	60	40	15



Şekil 3

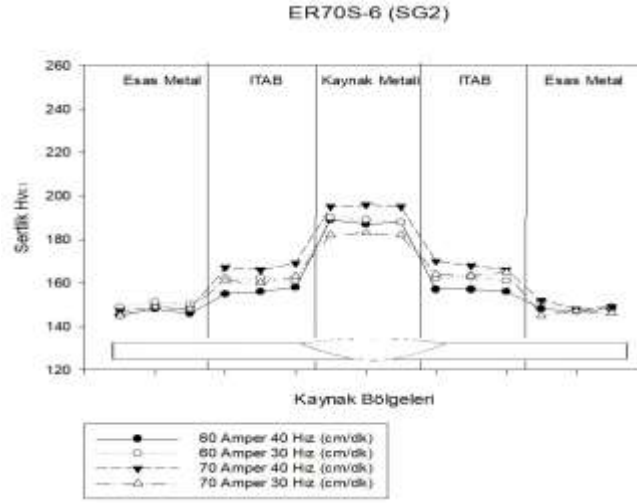
Tablo 4 ve 5’de verilen parametrelere kaynatılan numunelerin tamamı şekil 4’da verilen bakalıte alınmıştır.



Şekil 4

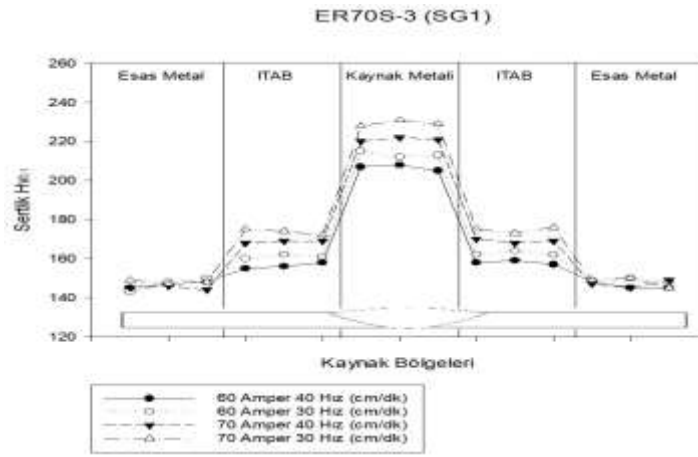
BULGULAR

E195 çelik boruların robotik MAG kaynağında; ER70S-3 teli kullanımı, ısıl döngülere karşı yüksek mikroyapısal hassasiyet göstererek tahmin edilebilirliği düşük ve kırılganlığa daha yatkın (yüksek HV) bir kaynak dikişi üretmektedir. Buna karşın, ER70S-6 teli; kimyasal kompozisyonundaki yüksek deoksidizanlar sayesinde termal dalgalanmaları kompanze etmiş, robotik prosesin hız ve amper değişikliklerine karşı metalurjik kararlılık göstermiş ve daha tok/sünek (düşük HV) bir kaynak metali eldesini sağlamıştır. Endüstriyel uygulamalarda yorulma ömrü ve darbe direnci beklentisi için optimum dolgu metalinin ER70S-6 olduğu görülmüştür.



Şekil 5

Şekil 5 numaralı, ER70S-6 dolgu teli ile yapılan bu uygulamada maksimum mekanik sertliğe "70 Ampere 40 Hız" parametresi ile ulaşılmıştır. İlerleme hızının düşürülmesi, özellikle yüksek amperde ısı girdisini artırarak sertlikte belirgin bir kayba yol açmaktadır.



Şekil 6

Şekil 6 numaralı grafikte en yüksek mikrosertlik değerine 70 Ampere 30 Hız parametresi ile ulaşılmıştır. Tepe sertlik noktaları kaynak merkezinde değil, füzyon sınırlarına (ITAB geçişlerine) yakın bölgelerde yoğunlaşmaktadır. İlerleme hızının 30'da tutulması, bu sınır bölgelerindeki sertliği 40 hız parametresine kıyasla belirgin şekilde artırmıştır.

SONUÇ VE TARTIŞMA

E195 boruların robotik MAG kaynağında ER70S-3 dolgu teli kullanıldığında, maksimum mekanik sertliğe "70 Amper 30 Hız" parametresiyle ulaşılmaktadır. ER70S-6'nın aksine tepe sertlikler kaynak merkezinde değil, füzyon sınırlarında ortaya çıkmaktadır. Bu tezat durum, ER70S-3'ün kimyasal kompozisyonundaki deoksidan element (Silisyum ve Mangan) miktarlarının ER70S-6'ya göre daha düşük olması nedeniyle, aynı kaynak parametreleri altında ergime havuzunda tamamen farklı bir soğuma, katılaşma ve faz dönüşümü karakteristiği yaratmasından kaynaklanmaktadır. Bu durumlar göz önüne alındığında ER70S-6 kaynak telinden yapılan işlemlerde sertliklerin düşük olduğu ve kaynak işlemi sonrası oluşan kırılganlığın elimine edildiği görülmüştür.

KAYNAKÇA

Anık, S., & Vural, M. (1993). Gazaltı ark kaynağı: (TIG - MIG - MAG) (Yayın No: 3). Gedik Eğitim Vakfı Kaynak Teknolojisi Eğitim Araştırma ve Muayene Enstitüsü.

Lancaster, J. F. (1999). Metallurgy of welding. Elsevier.

Harman, M., Ada, H., & Çetinkaya, C. (2020). QStE 420 TM çeliğinin MAG kaynak yöntemiyle kaynaklanmasında dolgu metali türünün metalürjik ve mekanik özelliklere etkisinin belirlenmesi. Politeknik Dergisi, 23(2), 321-332.

Bailey, N. (1994). Weldability of ferritic steels. Elsevier.

Palani, P. K., & Murugan, N. (2006). Selection of parameters of pulsed current gas metal arc welding. Journal of Materials Processing Technology, 172(1), 1-10.

Cornu, J. (2013). Advanced welding systems: 1 fundamentals of fusion welding technology. Springer Science & Business Media.

Montgomery, D. C. (2017). Design and analysis of experiments. John Wiley & sons.

Polikarbonat Oftalmik Lenslerin Kesim Sürecinde Oluşan Mikroplastiklerin Tespiti

Teslime ÖZBAY¹, Erdinç TİMOÇİN²

¹E-mail: teslimetoku@gmail.com; Mersin Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, Tıbbi Hizmetler ve Teknikler Bölümü, Mersin / Türkiye

²E-mail: erdinctimocin@mersin.edu.tr; Mersin Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, Tıbbi Hizmetler ve Teknikler Bölümü, Mersin / Türkiye

Özet

Plastik kullanımının artmasıyla birlikte mikroplastikler (MP), çevresel sürdürülebilirlik açısından giderek büyüyen bir sorun haline gelmiştir. Optik sektöründe gözlük lenslerinin şekillendirme işlemleri sırasında ortaya çıkan atıkların önemli bir MP kaynağı olabileceği düşünülmektedir. Ancak bu alanda gerçekleştirilen çalışmalar oldukça sınırlıdır. Bu çalışmada, optik lens kesim süreçlerinde oluşan MP'lerin tespit edilmesi amaçlanmıştır. Araştırmada, optisyenlik sektöründe yaygın olarak kullanılan polikarbonat lensler incelenmiştir. Lenslerin kesim öncesi ve sonrası ağırlıkları karşılaştırılmış, işlem sırasında oluşan atık materyaller toplanarak mikroskopik yöntemlerle değerlendirilmiştir. Ölçümler sonucunda lens başına ortalama 14.00 gram olan başlangıç kütlelerinin, kesim işlemi sonrasında 2.18 gram seviyesine düştüğü belirlenmiştir. Buradan toplam kütleinin yaklaşık %85'inin işlem sırasında uzaklaştırılarak atık materyal hâline geldiği saptanmıştır. Mikroskopik incelemelerde atıkların büyük çoğunluğunun düzensiz şekilli talaşlar ve lifsi parçacıklardan oluştuğu gözlenmiştir. Sonuç olarak, optik mağazalarda gerçekleştirilen lens kesim işlemlerinin önemli miktarda MP oluşumuna neden olabileceği ve göz ardı edilen çevresel kirlenici bir kaynak olarak değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Atık Su, Gözlük Lensi, Mikroplastik, Optisyenlik

Abstract

The increasing use of plastics has made microplastics (MPs) an increasingly significant issue in terms of environmental sustainability. In the optical sector, waste generated during the shaping processes of ophthalmic lenses is considered a potential source of MPs. However, studies conducted in this field remain limited. This study aimed to identify MPs generated during optical lens cutting processes. In this research, polycarbonate lenses commonly used in the opticianry sector were examined. The weights of the lenses before and after cutting were compared, and the waste materials generated during the process were collected and evaluated using microscopic methods. Measurements revealed that the average initial mass per lens decreased from 14.00 g to 2.18 g after the cutting process. Accordingly, approximately 85% of the total mass was removed during processing and converted into waste material. Microscopic examinations showed that the majority of the waste consisted of irregularly shaped shavings and fibrous particles. In conclusion, lens cutting procedures routinely performed in optical stores may generate considerable amounts of MPs and represent an overlooked environmental source.

Keywords: Wastewater, Eyeglass Lens, Microplastic, Opticianry

GİRİŞ

Plastik malzemelerin hafif, dayanıklı, ekonomik ve kolay işlenebilir özellikleri nedeniyle günlük yaşamda kullanım alanları hızla artmıştır. Ambalaj sanayiinden otomotive, tekstilden sağlık sektörüne kadar birçok alanda yaygın olarak kullanılan plastikler, kullanım ömrü sonunda veya çeşitli mekanik süreçler sırasında daha küçük parçacıklara ayrılarak çevresel kirliliğe neden olmaktadır (Arı ve Ögüt, 2021). Çapı 5 mm'den küçük olan bu parçacıklar MP olarak tanımlanmakta olup günümüzde sucul ekosistemlerde, toprakta, atmosferde ve hatta insan dokularında tespit edilmeleri nedeniyle önemli bir çevresel sorun olarak değerlendirilmektedir. MP'ler yalnızca görsel bir atık problemi oluşturmakla kalmamakta; içerdiği katkı maddeleri ve yüzeylerine absorbe ettikleri kirlleticiler nedeniyle ekolojik ve biyolojik riskler de taşımaktadır (Lee ve ark., 2021; Yu ark., 2025).

Son yıllarda yapılan çalışmalar, MP kirliliğinin yalnızca büyük ölçekli sanayi kuruluşlarından kaynaklanmadığını, günlük yaşam içerisinde faaliyet gösteren küçük ve orta ölçekli işletmelerin de bu kirliliğe önemli ölçüde katkı sağlayabildiğini göstermektedir. Araç lastiği aşınması, tekstil yıkama süreçleri, boya uygulamaları, plastik işleme atölyeleri ve küçük üretim tesisleri bu kaynaklar arasında yer almaktadır (Chaudhary ark., 2025). Bununla birlikte hizmet sektöründe faaliyet gösteren bazı işletmelerin MP üretim potansiyeli henüz yeterince araştırılmamıştır. Bu alanlardan biri de optik sektörüdür.

Optik mağazalarda reçeteli gözlüklerin hazırlanması sürecinde ham lensler, çerçeve ölçülerine uygun hâle getirilmek amacıyla çeşitli mekanik işlemlerden geçirilmektedir. Bu işlemler arasında lens kenar kesimi, taşlama, kanal açma, inceltme, faset verme ve montaj uygulamaları yer almaktadır. Özellikle otomatik lens kesim cihazlarında kullanılan yüksek devirli aşındırıcı taşlar ve kesici diskler nedeniyle lens materyalinden talaş, toz ve mikron boyutunda parçacıklar ayrılmaktadır. İşlem sırasında oluşan ısıнын azaltılması ve yüzey kalitesinin artırılması amacıyla çoğu cihazda su kullanılmakta; oluşan parçacıklar ise su ile birlikte atık haznesine veya kanalizasyon sistemine taşınabilmektedir.

Gözlük lensleri çoğunlukla CR-39 (allyl diglikol karbonat), polikarbonat, yüksek indeksli reçineler, Trivex ve çeşitli poliüretan esaslı polimerlerden üretilmektedir. Bu materyaller; optik performans, darbe dayanımı, hafiflik ve inceltme avantajları nedeniyle yaygın olarak tercih edilmektedir. Bununla birlikte söz konusu materyallerin büyük bölümü sentetik polimer yapısında olduğundan, lens kesim işlemleri sırasında oluşan katı atıkların önemli bir kısmının MP karakteri taşıdığı değerlendirilmektedir. Özellikle polikarbonat lensler, dayanıklılık ve hafiflik özellikleri nedeniyle yaygın kullanım alanına sahip olup yoğun mekanik işleme maruz kalan materyaller arasında yer almaktadır.

Optik mağazalar bireysel olarak değerlendirildiğinde düşük miktarda atık üretiyor gibi görünse de şehir ölçeğinde çok sayıda işletmede her gün gerçekleştirilen lens kesim işlemleri, toplam MP yükünü artırabilecek önemli bir faktör olarak değerlendirilmektedir. Buna karşın literatürde optik mağaza kaynaklı MP oluşumunu doğrudan inceleyen çalışma sayısı oldukça sınırlıdır. Mevcut araştırmalar çoğunlukla genel plastik kirliliği, endüstriyel üretim atıkları veya medikal polimerler üzerine yoğunlaşmış; lens kesim süreçleri ise büyük ölçüde göz ardı edilmiştir. Bu durum, sektöre özgü sürdürülebilirlik politikalarının geliştirilmesini zorlaştırmaktadır.

Bu çalışmada, optik mağazalarda gerçekleştirilen lens kesim süreçleri sırasında oluşan MP parçacıklarının varlığının ortaya konulması amaçlanmıştır. Araştırma kapsamında yaygın olarak kullanılan oftalmik lens materyallerinin işlem öncesi ve sonrası kütle değişimleri incelenmiş, kesim işlemleri sırasında oluşan parçacıklar toplanarak miktar ve boyut açısından değerlendirilmiştir. Böylece optik mağazalarının potansiyel bir MP kaynağı olup olmadığı araştırılmıştır.

Elde edilecek bulguların; optik sektöründe çevresel farkındalığın artırılmasına, atık yönetim stratejilerinin geliştirilmesine, uygun toplama ve geri dönüşüm sistemlerinin oluşturulmasına ve MP salınımını azaltmaya yönelik yeni teknolojilerin geliştirilmesine katkı sağlaması beklenmektedir. Ayrıca çalışma, küçük ölçekli hizmet işletmelerinin çevresel etkilerinin ortaya konulması açısından da önem taşımaktadır.

YÖNTEM

Bu çalışmada, optik mağazalarda yaygın olarak kullanılan standart oftalmik polikarbonat lensler numune materyali olarak seçilmiştir. Lens kesim süreçlerinde oluşan MP karakterli parçacıkların belirlenebilmesi amacıyla kontrollü laboratuvar koşullarında kesim işlemleri gerçekleştirilmiştir. Tüm işlemler, rutin optik mağaza uygulamalarını temsil edecek şekilde yaygın olarak kullanılan otomatik lens kesim cihazı ile yürütülmüştür.

Kesim işlemleri öncesinde her bir lensin başlangıç kütlesi, 0.001 g hassasiyetine sahip dijital analitik terazi kullanılarak ölçülmüş ve kayıt altına alınmıştır. Ardından lensler çerçeve ölçülerine uygun şekilde kesilmiş, taşlama ve kenar düzeltme işlemleri uygulanmıştır. İşlem sonrasında lenslerin nihai kütleleri tekrar ölçülmüş ve başlangıç ile son ölçümler arasındaki fark hesaplanmıştır. Böylece kesim sürecinde meydana gelen materyal kaybı nicel olarak belirlenmiştir.

MP varlığının araştırılması amacıyla lens kesim işlemleri sırasında oluşan atık sular toplanmış ve 1.2 µm gözenek çapına sahip cam elyaf filtrelerden geçirilmiştir. Filtrasyon işlemlerinde vakum filtrasyon sistemi kullanılmıştır. Filtre üzerinde biriken katı örnekler, sabit ağırlığa ulaşınca kadar oda sıcaklığında kurutulmuş ve nemden arındırıldıktan sonra hassas terazide tartılmıştır. Böylece işlem sırasında oluşan toplam parçacık kütlesi hesaplanmıştır.

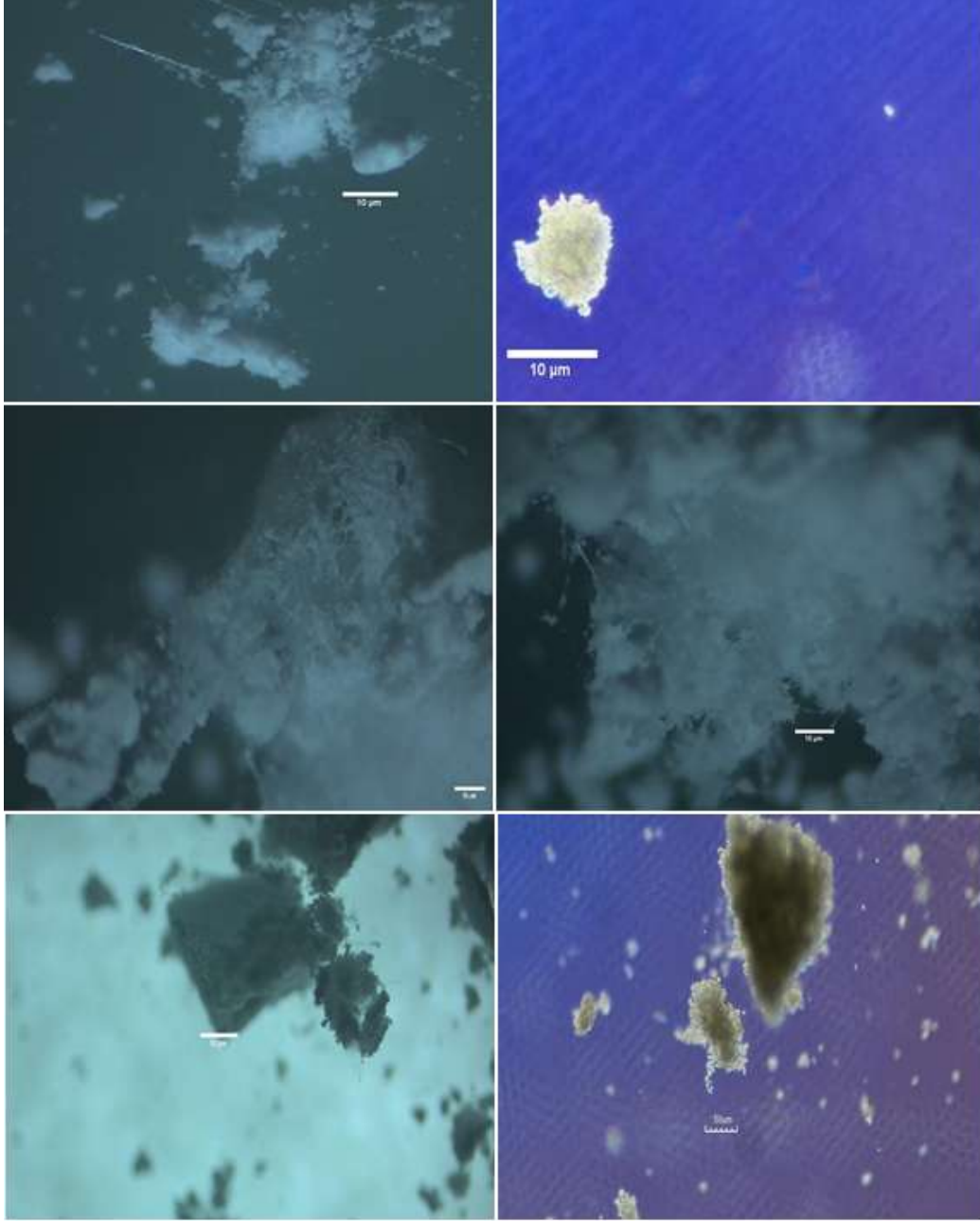
Toplanan örneklerin morfolojik özelliklerinin incelenmesi ve görüntülerinin kaydedilmesi amacıyla stereo mikroskop ve ışık mikroskobu kullanılmıştır. Mikroskobik analizlerde parçacıkların boyut dağılımı, şekil özellikleri, yüzey yapısı ve renk kriterleri değerlendirilmiştir. Parçacıklar; lifsi, düzensiz kırıntı, talaş benzeri ve granüler yapıları açısından sınıflandırılmıştır. Ayrıca oküler mikrometre kullanılarak parçacık boyutları ölçülmüş ve farklı boyut gruplarına ayrılmıştır.

Elde edilen tüm veriler istatistiksel yöntemlerle değerlendirilmiş, lens başına oluşan ortalama kütle kaybı ile oluşan MP miktarı arasındaki ilişki araştırılmıştır. Böylece optik lens kesim işlemlerinin MP üretim potansiyeli nicel ve nitel açıdan ortaya konulmuştur.

BULGULAR

Polikarbonat oftalmik lenslerin kesim sürecinde oluşan MP'lerin belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilen bu çalışmada, optik lens işleme süreçleri sırasında dikkate değer miktarda plastik esaslı parçacık olduğu tespit edilmiştir. Kesim öncesi ve sonrası kütle ölçümlerinin karşılaştırılması sonucunda, lens materyalinin önemli bir bölümünün işlem sırasında uzaklaştırıldığı belirlenmiştir.

Ölçümler doğrultusunda, lens başlangıç kütlesinin yaklaşık 84.76 ± 0.72 'lik kısmının kesim, taşlama ve kenar şekillendirme işlemleri sırasında talaş ve ince parçacık formunda ayrıldığı hesaplanmıştır. Toplanan örneklerin mikroskopik incelemelerine ait görüntüler Şekil 1'de sunulmuştur. Görsel analizler sonucunda oluşan parçacıkların düzensiz kırıntı, ince talaş, granüler yapı ve lifsi parçacık formunda olduğu gözlenmiştir. Örneklerin boyutsal analizleri sonucunda, parçacıkların önemli bir kısmının 10 μm ile 65 μm aralığında dağılım gösterdiği, az bir kısmının ise milimetre boyutuna ulaştığı belirlenmiştir. Ayrıca yüksek devirli kesim işlemleri sonrasında daha küçük boyutlu parçacık oluşumunun arttığı belirlenmiştir. Bu durum, mekanik aşındırma şiddetinin parçacık boyutu üzerinde etkili olabileceğini göstermektedir.



Şekil 1. Polikarbonat oftalmik lenslerin kesim ve şekillendirme işlemleri sonrasında oluşan atıklara ait mikroskopik görüntüler.

SONUÇ VE TARTIŞMA

Bu çalışmada elde edilen bulgular, polikarbonat oftalmik lenslerin kesim ve şekillendirme süreçlerinde önemli miktarda polimer esaslı MP karakterli parçacık oluştuğunu göstermektedir. Özellikle yüksek devirli kesim işlemleri sonrasında daha küçük boyutlu parçacık oluşumunun arttığı belirlenmiş olup, bu durum mekanik aşındırma şiddetinin parçacık boyutu üzerinde belirleyici bir etkiye

sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca tespit edilen parçacık boyutlarının büyük ölçüde 10–65 μm aralığında yoğunlaştığı, az bir kısmının ise milimetre seviyesine ulaştığı belirlenmiştir. Bu dağılım, optik lens işleme süreçlerinin MP boyut aralığında parçacık üretme potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir.

Elde edilen sonuçlar, optik mağazalarda rutin olarak gerçekleştirilen lens kesim işlemlerinin potansiyel bir MP kaynağı olduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle günlük işlem sayısının yüksek olduğu işletmelerde toplam parçacık yükünün çevresel açıdan anlamlı düzeylere ulaşabileceği değerlendirilmektedir. Araujo ve ark., (2025) dünya genelinde optik faaliyetlerden kaynaklanan yıllık yaklaşık 5800 ton plastik atık salındığını bildirmiştir. Benzer şekilde Oliveira ve ark., (2024), optik sektörünün karbon ayak izinin önemli seviyelere ulaştığını ve alınacak önlemlerin çevresel etkilerin azaltılmasına katkı sağlayacağını vurgulamıştır. Mevcut çalışmada ise lens materyalinin büyük bölümünün işlem sırasında talaş ve ince parçacıklar formunda uzaklaşarak atık kütesini oluşturduğu belirlenmiş olup, bu durum optik sektörünün çevresel etkilerinin yeniden değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

Literatürde MP kaynakları çoğunlukla ambalaj atıkları, tekstil lifleri, lastik aşınması ve endüstriyel plastik işleme süreçleri ile ilişkilendirilmektedir (Chaudhary ve ark., 2025). Ancak bu çalışma, küçük ölçekli hizmet işletmeleri arasında yer alan optik mağazaların da MP oluşumuna katkı sağlayabileceğini ortaya koymaktadır. Lee ve ark., (2021) tarafından bildirildiği üzere, bir çift gözlük merceğinin kesim ve şekillendirme işlemleri için ortalama 20 L su kullanılmakta, bir optik mağazasında günlük 10–20 gözlük camı işlenmesi durumunda yaklaşık 400 L atık su ve 62,53 g/L MP oluşabileceği ifade edilmektedir. Tek bir işletmede oluşan miktar sınırlı görünse de, şehir ölçeğinde çok sayıda optik mağazanın varlığı ve günlük işlem hacmi dikkate alındığında toplam çevresel yükün önemli düzeylere ulaşabileceği değerlendirilmektedir.

Mikroskobik incelemelerde gözlenen düzensiz şekilli ve 10-65 μm boyutlarındaki parçacıklar, bu atıkların hava, yüzey veya sıvı ortamlar aracılığıyla çevreye kolaylıkla taşınabileceğini düşündürmektedir. Özellikle küçük boyutlu parçacıklar, uygun atık yönetimi uygulanmadığı durumlarda kanalizasyon sistemlerine, toprak ortamına ve iç mekân havasına karışma potansiyeline sahiptir. Bu nedenle optik mağazalarda yalnızca hijyen ve iş güvenliği açısından değil, aynı zamanda çevresel sürdürülebilirlik açısından da yeni uygulamalara ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu kapsamda, lens kesim cihazlarında parçacık toplama sistemlerinin geliştirilmesi, kuru atıkların ayrı toplanması, düzenli bakım prosedürlerinin uygulanması ve oluşan polimer atıkların geri dönüşüm süreçlerine kazandırılması önerilmektedir. Ayrıca üretici firmaların daha az talaş oluşturan lens materyalleri geliştirmesi ve kesim teknolojilerinin optimize edilmesi, MP oluşumunun azaltılmasına katkı sağlayabilir.

Sonuç olarak, optik lens işleme süreçleri bugüne kadar yeterince dikkat çekmemiş bir MP kaynak alanıdır. Bu çalışma, optik sektöründe sürdürülebilir uygulamaların geliştirilmesi gerektiğini ortaya koymakta ve gelecekte farklı lens materyalleri ve farklı kesim teknolojileri ile yapılacak ayrıntılı çalışmalar için bir temel oluşturmaktadır.

KAYNAKÇA

Araújo, J., Ramos, P., Silvestre, E., Mateus, A., Massano, A., Nikitin, T., et al. (2026). Physical and chemical characterisation of ophthalmic lens-grinding wastewater: Uncovering environmental implications. *Environmental Science and Pollution Research*, 1–16.

Arı, M. ve Öğüt, S. (2021). Mikroplastikler ve çevresel etkileri. *Düzce University Journal of Science and Technology*, 9(2), 864–877.

Chaudhary, H. D., Shah, G., Bhatt, U., Singh, H., & Soni, V. (2025). Microplastics and plant health: A comprehensive review of sources, distribution, toxicity, and remediation. *npj Emerging Contaminants*, 1(1), 8.

Lee, J., Choi, Y., Jeong, J., & Chae, K. J. (2021). Eye-glass polishing wastewater as significant microplastic source: Microplastic identification and quantification. *Journal of Hazardous Materials*, 403, 123991.

Oliveira, A. P., Martinez-Perez, C., Barqueira, A., Alvarez-Peregrina, C., & Sánchez-Tena, M. Á. (2024). Optical material recycling practices: A look at Portuguese optical centers. *Sustainability*, 16(14), 5931.

Yu, X., Zhou, N., Gao, Q., Peijnenburg, W. J., Yin, K., Li, L., & Wang, Y. (2025). Microplastics and nanoplastics in the ocular environment: Pathways, toxic effects, and future challenges. *Current Research in Toxicology*, 100251.

Coefficient Estimates For Certain Subclasses of Analytic Functions

Osman ALTINTAŞ¹, Aslan BAHTİYAR²

¹oaltinta@baskent.edu.tr : Baskent University, Education Faculty, Department of Mathematics
Education, Ankara / Türkiye.

²a.bahtiyar@metavtek.com : META Technology Group Ankara/ Türkiye.

Abstract

In this study we define the class $K_{w_0}(\alpha, A, B)$ which contains the class of quasi-starlike and close-to-starlike functions with respect to a point $w_0 = f(z_0)$ in the unit disk and we obtain coefficient bounds for functions in the classes.

2000 AMS 30 C 45

Keywords: Analytic function, starlike function, quasi-starlike function, close-to-starlike function.

1. Introduction

Let H denote the class of functions of the form

$$f(z) = z + \sum_{n=2}^{\infty} a_n z^n, \quad g(z) = z + \sum_{n=2}^{\infty} b_n z^n, \quad (1.1)$$

are analytic in the open unit disk $U = \{z: z \in \mathbb{C} \text{ and } |z| < 1\}$.

Definition 1.1.

Let $f(z)$ and $g(z)$ in the form (1.1).

We say that f is subordinate to g in U , written $f < g$, if there exists a function $\phi(z)$ analytic in U , with $\phi(0) = 0$ and $|\phi(z)| \leq |z|$ such that

$$f(z) = g(\phi(z)).$$

Definition 1.2.

$$S_{w_0}^*(A, B) = \left\{ f \in H: \frac{zf'(z) - w_0}{f(z) - w_0} < \frac{1 + AZ}{1 + BZ}, -1 \leq B \leq A < 1, w_0 = f(z_0) \right\}$$

is the class of functions with respect to point w_0 .

Definition 1.3. (New Definition)

$$K_{w_0}(\alpha, A, B) = \left\{ f \in H : \frac{(1-\alpha)f(z) + \alpha z f'(z) - w_0}{g(z) - w_0} < \frac{1+AZ}{1+BZ} \right\}$$

where

$$g \in S_{w_0}^*(A, B), \quad -1 \leq B \leq A < 1, \quad 0 \leq \alpha \leq 1 \quad w_0 = f(z_0).$$

It is clear that $K_{w_0}(0, A, B) = CS_{w_0}^*(A, B)$ is the class of functions close-to-starlike with respect to point w_0 .

and

$K_{w_0}(1, A, B) = QS_{w_0}^*(A, B)$ is the class of functions quasi-starlike with respect to point w_0 .

If $w_0 = 0$ then $CS^*(1, -1) = CS^*$, $QS^*(1, -1) = QS^*$.

The classes $CS_{w_0}^*(A, B)$ and $QS_{w_0}^*(A, B)$ are studied in [4]. CS^* and QS^* are studied in [1], [2], [3].

Lemma 1.1. [6].

If $h(z) = 1 + c_1 z + c_2 z^2 + \dots$ is analytic in U ,

and

$$h(z) < \frac{1+AZ}{1+BZ} \quad -1 \leq B \leq A < 1$$

then

$$\operatorname{Re} h(z) > \frac{1-A}{1-B} \quad \text{and} \quad |c_n| \leq \frac{2(A-B)}{1-B}.$$

In this study we introduce the new class $K_{w_0}(\alpha, A, B)$ and obtained the coefficient bounds in this class and special values of parameters α, A, B, w_0 the results in literature by corollaries.

The coefficient estimates problems are important in Geometric Function Theory. The classes starlike functions (S^*), close-to-starlike function (CS^*) and quasi-starlike function (QS^*) are important subclasses of analytic and univalent functions. The above classes are defined and studied in [5].

We know that in [5]

$$f \in S^* \Rightarrow |a_n| \leq n$$

$$f \in QS^* \Rightarrow |a_n| \leq n$$

$$f \in CS^* \Rightarrow |a_n| \leq n^2$$

The bounds are sharp for the functions

$$f(z) = \frac{z}{(1-z)^2}, \quad f(z) = \frac{z(1+z)}{(1-z)^3}, \quad zf'(z) = \frac{z(1+z)}{(1-z)^3}.$$

2. Main Results

Theorem 2.1.

Let us $f \in S_{w_0}^*(A, B)$.

Then we have

$$|a_n| \leq \frac{(k+1)(k+2)\dots(k+n-2)}{(n-1)!} U,$$

where

$$k = \frac{2(A-B)}{1-B}, \quad U = k + (k+1)|w_0|, \quad -1 \leq B \leq A \leq 1, \quad w_0 = f(z_0).$$

Proof. Suppose $f \in S_{w_0}^*(A, B)$.

We have from Definition 1.2.

and Lemma 1.1.

$$\frac{zf'(z) - w_0}{f(z) - w_0} = h(z) \prec \frac{1+AZ}{1+BZ}$$

and

$$zf'(z) - w_0 = (z + a_2z^2 + \dots - w_0)(1 - c_1az + c_2z^2 + \dots)$$

$$na_n = c_{n-1} + c_{n-2}a_2 + \dots + c_2a_{n-1} + c_1a_{n-1} - w_0c_n + a_n$$

$$(n-1)|a_n| \leq k(1 + (|a_2| + \dots + |a_{n-1}| + |w_0|) + |w_0|),$$

$$(n-1)|a_n| \leq U + k(|a_2| + \dots + |a_{n-1}|),$$

$$U = k + (k+1)|w_0|, \quad k = \frac{2(A-B)}{1-B}$$

$$|a_2| \leq U, \quad |a_3| \leq \frac{k+1}{2!} U, \quad |a_4| \leq \frac{(k+1)(k+2)}{3!} U$$

and by induction

$$|a_n| \leq \frac{(k+1)(k+2)\dots(k+n-2)}{(n-1)!} U.$$

The completes the proof.

Theorem 2.2.

Let $f \in K_{w_0}(\alpha, A, B)$. Then the following inequality holds

$$|a_n| \leq \frac{(k+1)(k+2)\dots(k+n-2)}{(n-1)![1+(n-1)\alpha]} U$$

where

$$k = \frac{2(A-B)}{1-B}, \quad U = k + (k+1)|w_0|, \quad 1 \leq B < A \leq 1.$$

Proof Since $f \in K_{w_0}(\alpha, A, B)$, from Definition 1.3.

there exists a function $g \in S_{w_0}^*(A, B)$ and $\operatorname{Re} h(z) > 0$

and

$$g(z) = z + \sum_{n=2}^{\infty} b_n z^n, \quad h(z) = 1 + \sum_{n=1}^{\infty} c_n z^n.$$

We have

$$(1-\alpha)f(z) + \alpha z f'(z) - w_0 = (z + b_2 z^2 + \dots + b_{n-1} z^{n-1} + b_n z^n - w_0) \\ (1 + c_1 z + c_2 z^2 + \dots)$$

$$(1 + (n-1)\alpha)a_n = c_{n-1} + b_2 c_{n-2} + \dots + b_n c_1 + w_0 c_n + b_n + w_0$$

$$(1 + (n-1)\alpha)|a_n| \leq U + k(|b_2| + |b_3| + \dots + |b_{n-1}|) + |b_n|$$

$$(1 + \alpha)|a_2| \leq U + |b_2| \leq 2U$$

$$|a_2| \leq \frac{2}{1+\alpha} U, \quad |a_3| \leq \frac{k+1}{2(1+2\alpha)} 3U.$$

$$|a_4| \leq \frac{(k+1)(k+2)}{3!(1+3\alpha)} 4U, \quad |a_5| \leq \frac{(k+1)(k+2)(k+3)}{4!(1+4\alpha)} 5U.$$

and by induction we have

$$|a_n| \leq \frac{(k+1)(k+2)\dots(k+n-2)}{(n-1)![1+(n-1)\alpha]} nU.$$

The proof is completed.

Corollary 2.1.

If $f \in S^*(A, B)$ then we have

$$|a_n| \leq \frac{k(k+1)(k+2)\dots(k+n-2)}{(n-1)!}. \quad (\text{see}[4])$$

We let $w_0 = 0$ in Theorem 2.1.

Corollary 2.2.

If $f \in S^*(1, -1) = S^*$ then we have

$$|a_n| \leq n. \quad (\text{see } [5])$$

Corollary 2.3.

If $f \in QS_{w_0}^*(A, B)$ then we have

$$|a_n| \leq \frac{(k+1)(k+2)\dots(k+n-2)}{(n-1)!} U. \quad (\text{see}[4])$$

We let $\alpha = 1$ Theorem 2.2.

Corollary 2.4.

If $f \in QS^*(A, B)$ then we have

$$|a_n| \leq \frac{k(k+1)(k+2)\dots(k+n-2)}{(n-1)!}. \quad (\text{see}[4])$$

We let $\alpha = 1, w_0 = 0$ in Theorem 2.2.

Corollary 2.5.

If $f \in QS^*(1, -1) = QS^*$ then we have

$$|a_n| \leq n. \quad (\text{see}[5])$$

We let $\alpha = 1, w_0 = 0$ in Theorem 2.2.

Corollary 2.6.

If $f \in CS^*(A, B)$ then we have

$$|a_n| \leq \frac{k(k+1)(k+2)\dots(k+n-2)}{(n-1)!} n. \quad (\text{see}[4])$$

We let $\alpha = 0, w_0 = 0$ in Theorem 2.2.

Corollary 2.7.

If $f \in CS^*(1, -1) = CS^*$ then we have

$$|a_n| \leq n^2 \quad (\text{see [5]})$$

We let $\alpha = 0, w_0 = 0, k = 2$ in Theorem 2.2.

3. Conclusion

In this work we introduced and studied certain subclasses of analytic functions in the open unit disk such as the starlike, quasi-starlike and close-to-starlike functions with respect to point $w_0 = f(z_0)$.

By defining the general class $K_{w_0}(\alpha, A, B)$ where $0 \leq \alpha \leq 1, -1 \leq B < A \leq 1$.

We obtain coefficient estimates for this class.

REFERENCES

- [1] Altıntaş O. and Aydoğan M. On the Coefficient of quasi-convex multivalent functions. International Symposium on academic studies in science (2019), 1234-1245
- [2] Altıntaş O. and Bahtiyar A. On quasi-starlike and close-to-starlike function with respect to a point 17. Uluslararası Bilimsel Çalışmalar Kongresi (2025) 347-349.
- [3] Altıntaş O. and Mustafa N. (2019). Coefficient bounds and distortion theoremas for the certain analytic functions. Turkish Journal of Mathematics, (2019). 43, 985-997
- [4] Altıntaş O. and Sarıkaya M. Z. Coefficient estimates for a subclass of certain subclasses of univalent functions (submitted) (2025)
- [5] Goodman A. W. Univalent Functions, Vol. 1, Vol.2, Tampa, Fl. Mariner (1983),
- [6] Srivastava H. Altıntaş O. Serenbay S. K. Coefficient bounds for certain sub classes of starlike functions of complex order. Applied Mathematics Letters 24 (8), 1359-1363.

Rize Ve Akçaabat'ta Maksimum Yağışların Yenilikçi Şen Yöntemleriyle Trend Analizi

Oğuzhan VERİM¹, Turgay PARTAL²

¹E-mail: ogzhnvrn@gmail.com; Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 55270, Samsun/TÜRKİYE

² E-mail: turgay.partal@omu.edu.tr; Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 55270, Samsun/TÜRKİYE

Özet

Bu çalışmada Doğu Karadeniz kıyılarında yer alan Rize ve Akçaabat meteoroloji istasyonlarına ait Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden temin edilen 1980–2024 dönemine ait 45 yıllık günlük maksimum yağış verilerinin aylık, yıllık ve mevsimsel trend özellikleri %95 güven aralıklarında incelenmiştir. Analizlerde parametrik olmayan Klasik Yenilikçi Şen(ITA) ve Poligonal Yenilikçi Şen(IPTA) testleri kullanılmıştır. ITA yöntemi ile aylık, mevsimlik, yıllık trendler belirlenmekte olup IPTA yöntemi ile aylık trend değişimleri değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde Rize istasyonunda yıllık ve tüm mevsimlerde artan trend gözlemlenmiştir. Aylık trendler değerlendirildiğinde Kasım ayında belirgin bir artan trend, Mayıs ayında ise azalan trend gözlemlenmiştir. Akçaabat istasyonunda genel olarak azalan trendler ağırlıkta olup en belirgin azalışın Kış ayında yaşandığı gözlemlenmiştir. IPTA yöntemine göre elde edilen grafikler değerlendirildiğinde Rize istasyonunda Temmuz, Ağustos, Eylül, Kasım, Aralık aylarında artan, Ekim, Ocak, Şubat ve Mayıs aylarında azalan trend gözlemlenmiştir. IPTA yöntemine göre elde edilen grafikler değerlendirildiğinde Akçaabat istasyonunda Temmuz ayında artan trend gözlemlenmiştir. Mart, Nisan, Mayıs ve Eylül aylarında trend gözlemlenmemiş olup diğer aylarda azalan trend belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler:

Günlük maksimum yağış, Klasik Yenilikçi Şen testi, Doğu Karadeniz kıyıları, Poligonal Yenilikçi Şen testi

Abstract

In this study, the monthly, annual, and seasonal trend characteristics of 45 years (1980–2024) of daily maximum precipitation data obtained from the Turkish State Meteorological Service for the Rize and Akçaabat meteorological stations, located along the Eastern Black Sea coast, were analyzed at a 95% confidence level. Non-parametric Classical Innovative Şen Trend Analysis (ITA) and Polygonal Innovative Şen Trend Analysis (IPTA) methods were employed. While the ITA method was used to determine monthly, seasonal, and annual trends, the IPTA method was utilized to evaluate transitions in monthly trends. The results indicate that an increasing trend was observed in the annual data and across all seasons at the Rize station. When monthly trends were examined, a significant increasing trend was detected in November, while a decreasing trend was observed in May. In contrast, decreasing trends were generally dominant at the Akçaabat station, with the most pronounced decline occurring during the winter season. According to the IPTA-based graphical evaluations, increasing trends were identified in July, August, September, November, and December at the Rize station, whereas decreasing trends were observed in October, January, February, and May. For the Akçaabat station, an increasing trend was only observed in July, while no trend was detected in March, April, May, and September; decreasing trends were identified in the remaining months.

Keywords:

Daily maximum rainfall, Classical Innovative Şen Test, Eastern Black Sea coast, Polygonal Innovative Şen Test

GİRİŞ

İklim değişikliği ve buna bağlı hidrolojik döngüdeki değişimler, özellikle ekstrem yağış olaylarının sıklığı ve şiddetinde önemli değişimlere yol açmaktadır. Bu durum taşkın, sel, heyelan gibi doğal afetlerin artmasına neden olmakta ve özellikle Doğu Karadeniz Bölgesi gibi topoğrafik açıdan hassas alanlarda riskleri artırmaktadır. Doğu Karadeniz Bölgesi, denize paralel uzanan dağlık yapısı nedeniyle orografik yağışların yoğun olarak görüldüğü bir bölgedir. Bu nedenle maksimum günlük yağışların zamansal değişiminin incelenmesi büyük önem taşımaktadır. Trend analizlerinde yaygın olarak kullanılan parametrik ve parametrik olmayan yöntemlerin yanında, son yıllarda geliştirilen Yenilikçi Şen Yöntemi (ITA), veri dağılımını ikiye ayırarak grafiksel yorumlama imkânı sunması açısından dikkat çekmektedir. Bu yöntemin geliştirilmiş versiyonu olan Poligonal Yenilikçi Şen Yöntemi (IPTA) ise aylık geçişleri ve trend değişimlerini daha detaylı ortaya koymaktadır. Doğu Karadeniz Bölgesinde yağışların değişimini inceleyen pek çok çalışmaya rastlamak mümkündür. **Kankal ve Akçay (2019)**, Doğu Karadeniz Bölgesinde bulunan Trabzon iline ait 2 meteoroloji istasyonuna (Trabzon ve Akçaabat) ait aylık, mevsimlik ve yıllık bazda yağış verilerini kullanarak trend analizi yapmışlardır. Her iki istasyonda sonbahar ve ilkbaharda genelde artan eğilimlere

rastlanılmıştır. Yaz mevsimi için Trabzon istasyonunda genellikle eğilim görülmezken, Akçaabat istasyonunda azalan eğilim ortaya çıkmıştır. Yıllık toplam yağışlar değerlendirildiğinde, Trabzon istasyonu için genellikle artan, Akçaabat istasyonu için genellikle değişmeyen eğilimler bulunmuştur. **Polat ve Sunkar (2017)** tarafından yapılan çalışmada Rize'nin iklim özellikleri ve Rize ilinin yağış ve sıcaklık trend analizi belirlemek için Rize, Pazar, Hopa ve Trabzon meteoroloji istasyonlarının uzun dönem (1970-2014) rasat verileri kullanmıştır. Bu çalışmada, Mann-Kendall ve Şen yöntemi kullanarak sıcaklık ve yağış trend analizi yapmışlardır. Mann-Kendall ve Şen analiz sonuçlarına göre Pazar dışındaki istasyonlarda sıcaklık trendinde belirgin artış, yağışta ise Hopa dışındaki istasyonlarda artış trendi görülmüştür. **Saphioğlu ve Çoban (2013)**, Karadeniz Bölgesi içerisinde bulunan 18 yağış ölçüm istasyonuna ait 1971-2010 yılları arasındaki yıllık toplam yağış değerlerine Mann-Kendall, regresyon ve Şen'in Yenilikçi eğilim yöntemlerini kullanarak trend analizi yapmışlardır. **Çeribaşı (2019)**, Doğu Karadeniz Havzasının yıllık ortalama yağış verilerinin gelecekteki trendini araştırmak için Şen Yöntemi ve Trend Yöntemleri kullanmıştır. Yapılan çalışma sonucunda, Şen yöntemi analiz sonuçlarına bakıldığında hemen hemen tüm istasyonlarda artan trend görülmüştür. **Tokgöz ve Partal (2020)**, Karadeniz Bölgesi'nin yağış ve sıcaklık verileri üzerine trend analizi uygulamışlardır. Bu amaçla 1960-2015 veri aralığına sahip 16 istasyona Mann-Kendall ve Yenilikçi Şen yöntemi testleri uygulanmıştır. Sonuçlar, Karadeniz Bölgesinde yıllık yağış ve sıcaklıkların genel olarak artış trendi gösterdiğini ortaya koymuştur. **Nemli (2017)**, Doğu Karadeniz Bölgesi'ne ait 10 meteoroloji istasyonu üzerinde yapılan çalışmada standart zamanlarda maksimum yağış yükseklikleri incelenmiş ve bölge genelinde artan trend tespit edilmiştir.

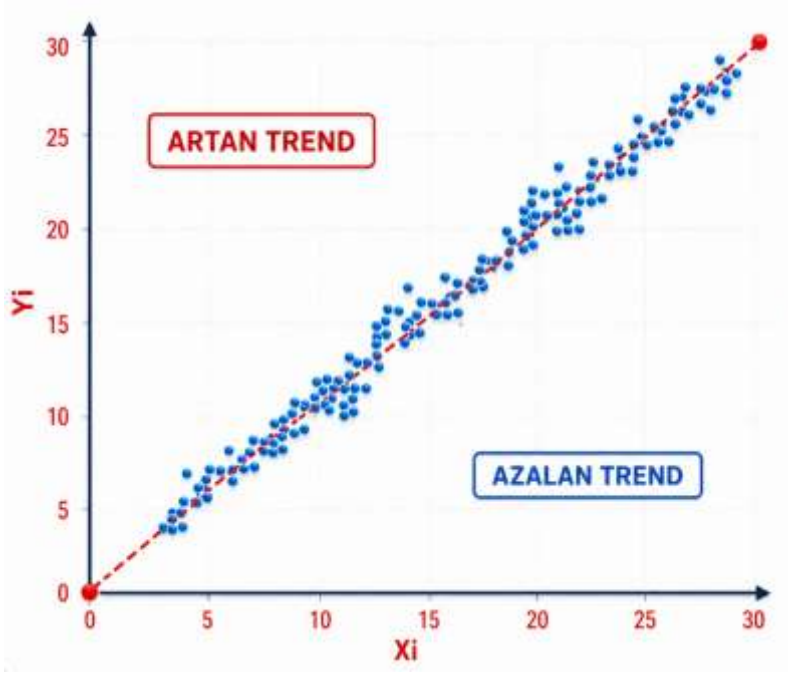
Bu çalışmanın amacı, Rize ve Akçaabat istasyonlarında maksimum günlük yağışların trendlerini ITA ve IPTA yöntemleri ile analiz ederek bölgesel farklılıkları ve aylık geçiş dinamiklerini ortaya koymaktır.

YÖNTEM

Trend Analizleri

1)Klasik Yenilikçi Şen (ITA) Yöntemi

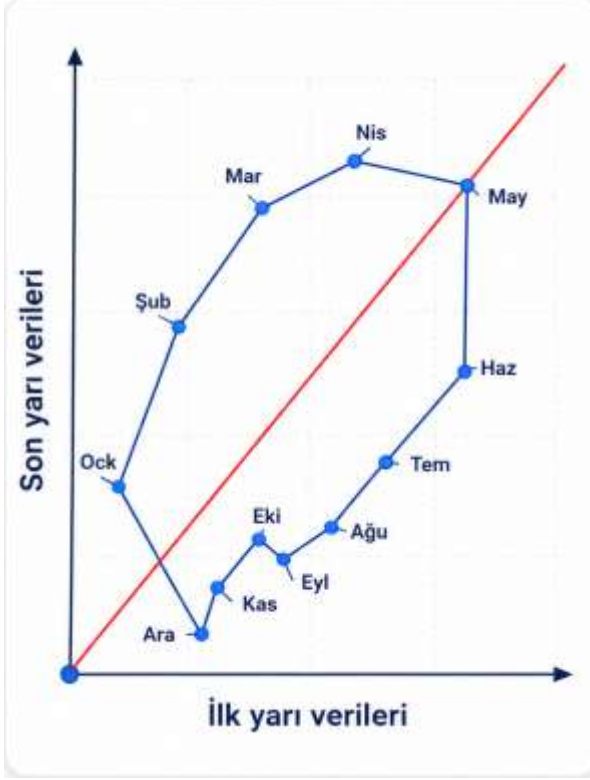
Şen (2012) iklimsel yönelimleri değerlendirmek için Şen'in Yenilikçi Eğilim Yöntemini ortaya koymuştur. Bu yöntem, ardışık zaman grupları arasındaki değişimleri incelemeyi sağlayan bir yöntemdir. Veriler ilk veriden itibaren eşit miktarda uzunlukta olacak şekilde iki ayrı veri grubuna ayrılarak, sıralı hale getirilmektedir. Daha sonra veriler ilk seri yatay ekseninde ikinci seri düşey ekseninde olacak şekilde çizilmektedir. Daha sonra 45° doğrusu çizilmekte ve işaretlenen veriler ile kıyaslama yapılmaktadır. Benzer zaman serileri yatay ve düşey eksenlere yerleştirildiğinde 1:1 (45°) doğrusu üzerine yerleşeceklerdir. Dolayısıyla ilk ve ikinci seri çiziminde veriler 1:1 (45°) doğrusu üzerinde dağılıyorsa incelenen seride herhangi bir yönelimin olmadığı anlaşılmaktadır. Bunun yanında dağılım 1:1 (45°) doğrusu üstünde dağılıyorsa artan yönde, altında dağılıyorsa azalan yönde bir yönelim söz konusu olmaktadır (Alashan vd., 2015).



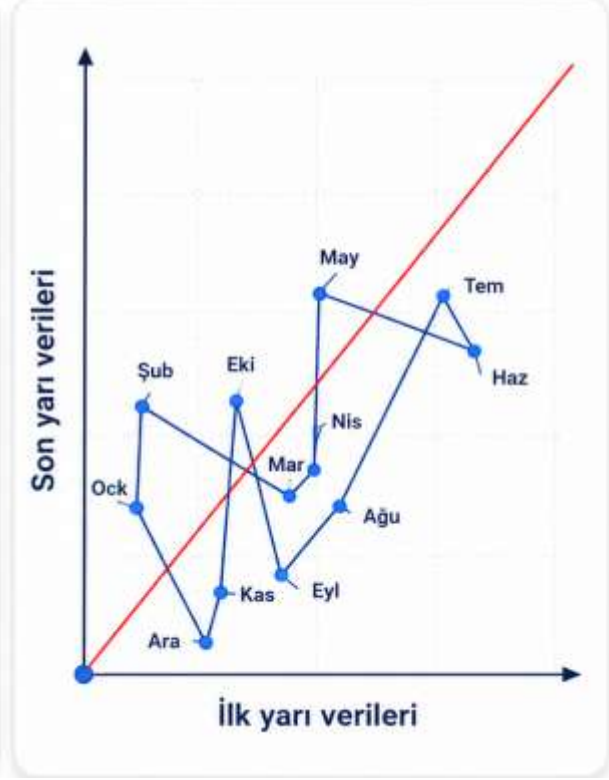
Şekil 1. Şen Yöntemi Sonucunu Gösteren Grafik

2)Poligonal Yenilikçi Şen (IPTA) Yöntemi

IPTA, 2019 yılında Şen tarafından geliştirilmiştir (Şen, 2019). IPTA yöntemi zaman serileri arasındaki (örneğin aylar) eğilimleri tespit eder. Tespit edilen eğilimler arasındaki geçişi poligon olarak görselleştirir. Bu yöntemde veriler 2 yarıya ayrılır. İlk yarı x eksenine, ikinci yarı y eksenine yazılarak saçılım grafiği oluşturulur. Bu grafiğe 1:1 (45°) çizgisi eklenir (Şen, 2021). Ardışık aylar arasındaki noktalar 12 kenarlı bir çokgen oluşturacak şekilde düz çizgilerle birleştirilir. Birleştirilen bu çizgilerin eğimi hem dikey hem de yatay yönde birbirine yeteri kadar yakınsa ardışık ayların ortalamasında kayda değer bir farklılık olmadığı kabul edilir (Şen, 2021). Oluşan çokgen, serinin zaman karşısındaki davranışı hakkında bize bilgi verir. Çokgenin alanı ne kadar küçükse aylık yağış ve hidro-meteorolojik olay oluşumu o kadar istikrarlıdır (Şen, 2019). Mevcut çokgen kimi zaman düzgün olabileceği gibi (Şekil 2) kimi zaman da dinamik ve karmaşık olabilir. (Şekil 3)



Şekil 2.
Örnek Düzgün Çokgen



Şekil 3.
Örnek Düzgün Olmayan Çokgen

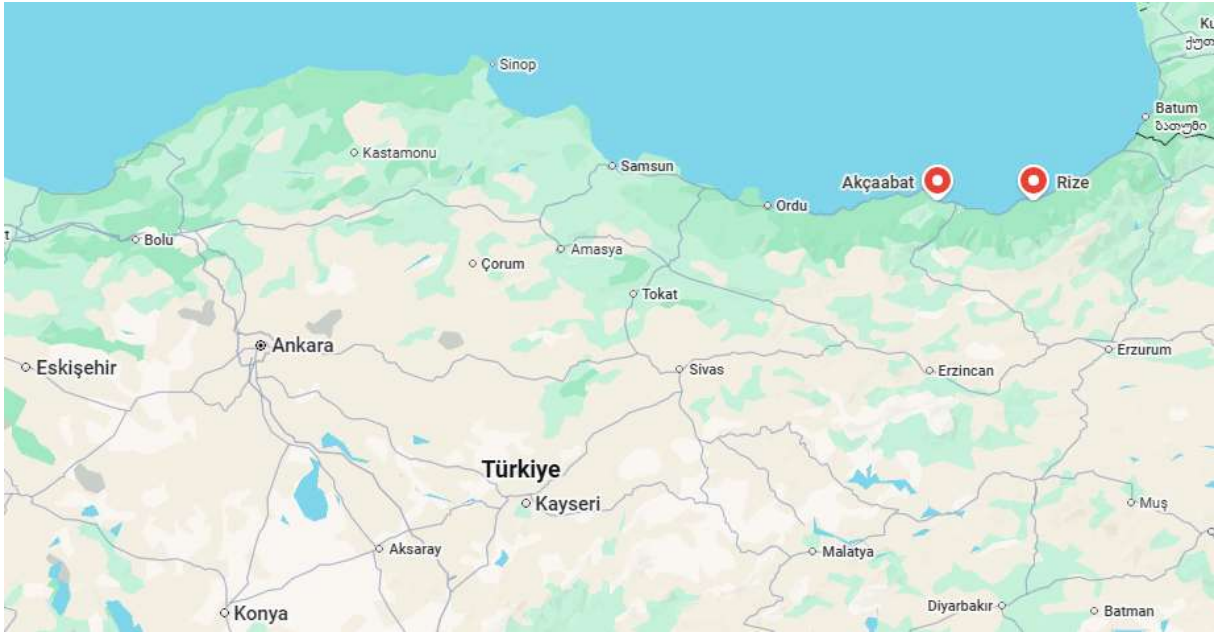
Bu durum incelenen meteorolojik olayın durumu ile doğru orantılıdır (Gümüş ve diğ. 2022). Çokgeni oluşturan çizgilerin uzunluğu bize veriler arasındaki farkı verir. Fark ne kadar fazlaysa aylar arasındaki veri değişimi de o kadar fazla olacaktır.

ÇALIŞMA ALANI

Bu çalışmada Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nün Rize ve Akçaabat istasyonlarından alınan 1980-2024 yılları arasındaki günlük maksimum yağış verilerinin aylık, yıllık ve mevsimsel olarak trend analizleri yapılmıştır. İstasyonlara ait temel bilgiler Tablo 1'de, istasyonların haritası ise Şekil 4'te verilmiştir.

İstasyon NO	İstasyon Adı	İl	İlçe	Enlem	Boylam	Rakım	Veri Aralığı
17040	Rize	Rize	Merkez	41.025513	40.517666	6	1980-2024
17626	Akçaabat	Trabzon	Akçaabat	41.022041	39.570869	11	1980-2024

Tablo 1. İstasyonlara ait temel bilgiler

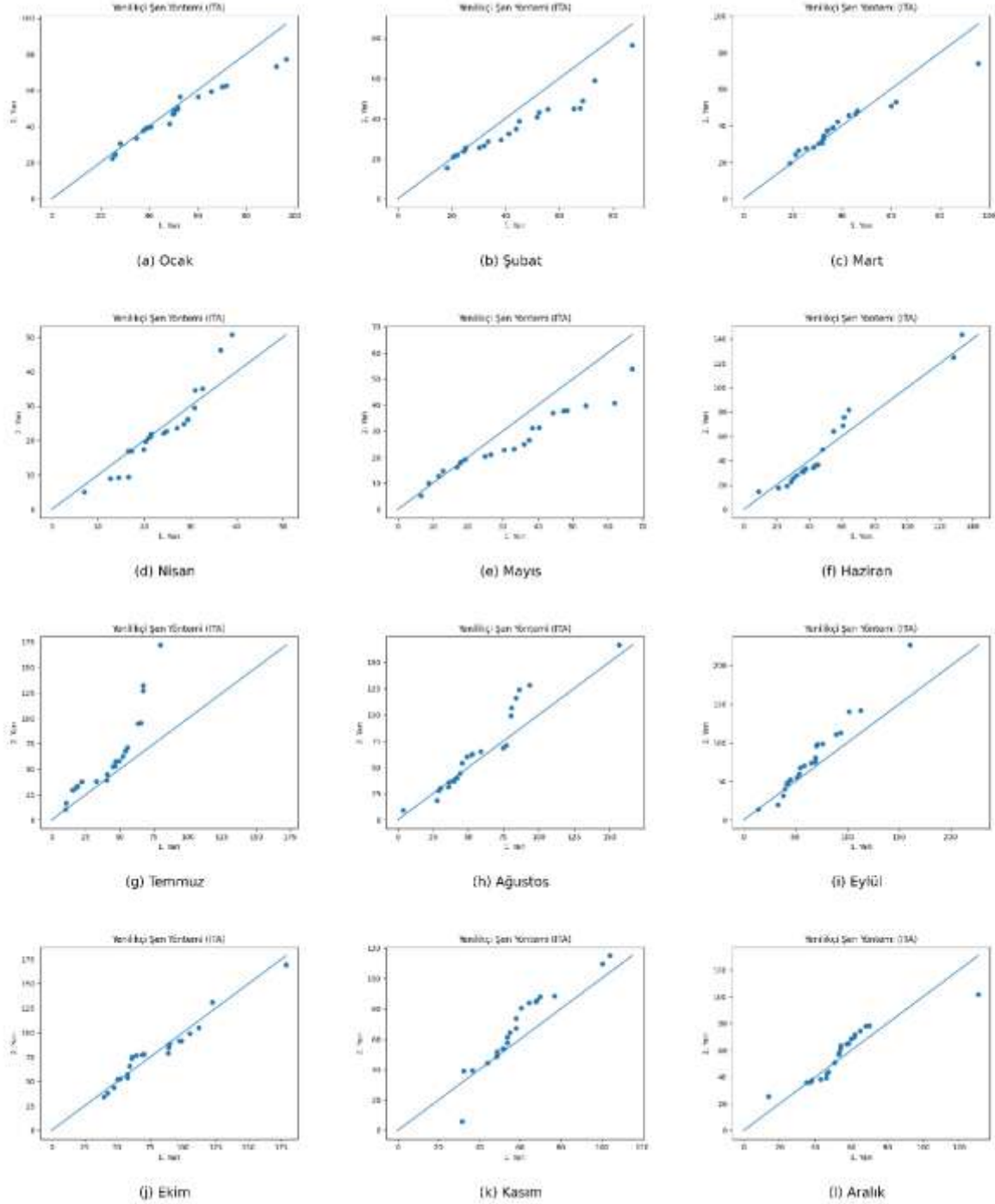


Şekil 4. Kullanılan Yağış İstasyonları

BULGULAR

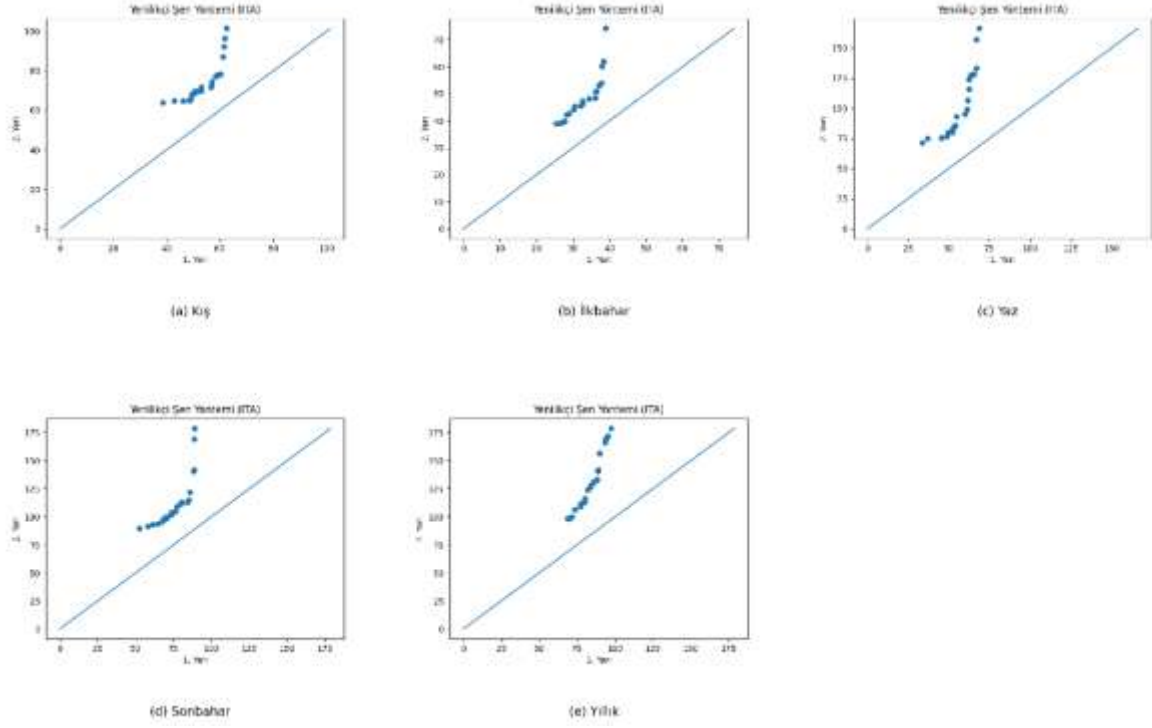
Bu bölümde Doğu Karadeniz kıyılarında yer alan iki istasyonun günlük maksimum yağışlarından elde edilen aylık, yıllık ve mevsimlik maksimum yağış değerlerinin trend analizleri ele alınmıştır. Bu amaçla 2 farklı Şen trend analizi yöntemi kullanılmıştır. Elde edilen bulgular aşağıda verilmiştir.

Rize İstasyonu trend analizi sonuçları



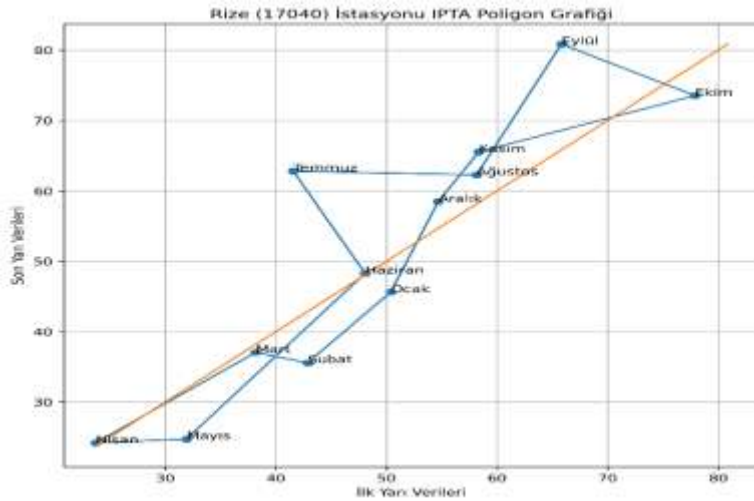
Şekil 5. Rize (17040) İstasyonuna ait 1980-2024 dönemi aylık maksimum günlük yağış serilerinin Yenilikçi Şen Yöntemi (ITA) ile analiz sonuçları

Rize istasyonuna ait aylık maksimum günlük yağışlarının trend analizi Şekil 5'te görülmektedir. Ocak ayı trend analizi incelendiğinde, düşük değerlerin azalan trend ile başlayarak trendsizlik eğrisi etrafında toplandığı, orta değerlerin azalan trend olarak başlayıp artan trend eğiliminde olduğu görülmektedir. Yüksek değerler içinse azalan trend olduğu görülmektedir. Şubat ayı trend analizi incelendiğinde, düşük değerlerin azalan trend ile başlayarak trendsizlik eğrisi etrafında toplandığı, orta ve yüksek değerlerin azalan trend olduğu gözlemlenmektedir. Mart ayı trend analizi incelendiğinde, Düşük değerlerin trendsizlik bölgesinden artan trende geçiş yaptığı daha sonrasında tekrar trendsizlik eğrisi etrafında toplandığı, orta değerlerin artan trend bölgesinden azalan trende geçiş yaptığı görülmektedir. Yüksek değerlerin ise azalan trend bölgesinde olduğu gözlemlenmiştir. Nisan ayı trend analizi incelendiğinde, düşük değerlerin azalan trend bölgesinde olduğu, orta değerlerin azalan trend bölgesinden artan trend bölgesine geçtiği, yüksek değerlerin ise artan trend olduğu gözlemlenmiştir. Mayıs ayı trend analizi incelendiğinde, düşük değerlerin trendsizlik bölgesinde olduğu, orta ve yüksek değerlerin ise azalan trend bölgesinde olduğu gözlemlenmiştir. Haziran ayı trend analizi incelendiğinde, düşük değerlerin artan trend bölgesinden azalan trende geçtiği, orta değerlerin artan trend bölgesinde olduğu, yüksek değerlerin ise azalan trendden artan trend bölgesine geçtiği görülmektedir. Temmuz ayı trend analizi incelendiğinde, düşük değerlerin trendsizlik bölgesinden artan trend bölgesine geçtiği daha sonrasında azalarak trendsizlik eğrisi etrafında toplandığı, orta ve yüksek değerlerin artan trend bölgesinde olduğu gözlemlenmiştir. Ağustos ayı trend analizi incelendiğinde, düşük değerlerin trendsizlik eğrisi etrafında toplandığı, orta ve yüksek değerlerin artan trend bölgesinde olduğu gözlemlenmiştir. Eylül ayı incelendiğinde, düşük değerlerin azalan trend bölgesinden trendsizlik eğrisine yöneldiği, orta ve yüksek değerlerin artan trend bölgesinde olduğu gözlemlenmiştir. Ekim ayı trend analizi incelendiğinde, düşük değerlerin azalan trendden artan trende geçiş yaptığı, orta değerlerin azalan trend ile başlayıp artan trende geçtiği, yüksek değerlerde azalan trend olduğu görülmektedir. Kasım ayı trend analizi incelendiğinde, genel olarak artan trend olduğu gözlemlenmiştir. Aralık ayı trend analizi incelendiğinde, düşük değerlerin artan trend olarak başlayıp azalan trende geçiş yaptığı, orta değerlerin artan trend bölgesinde olduğu, yüksek değerlerin ise azalan trendde olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 6. Rize (17040) İstasyonu maksimum günlük yağış serilerinin mevsimsel ve yıllık ölçekte Yenilikçi Şen Yöntemi (ITA) ile analiz sonuçları

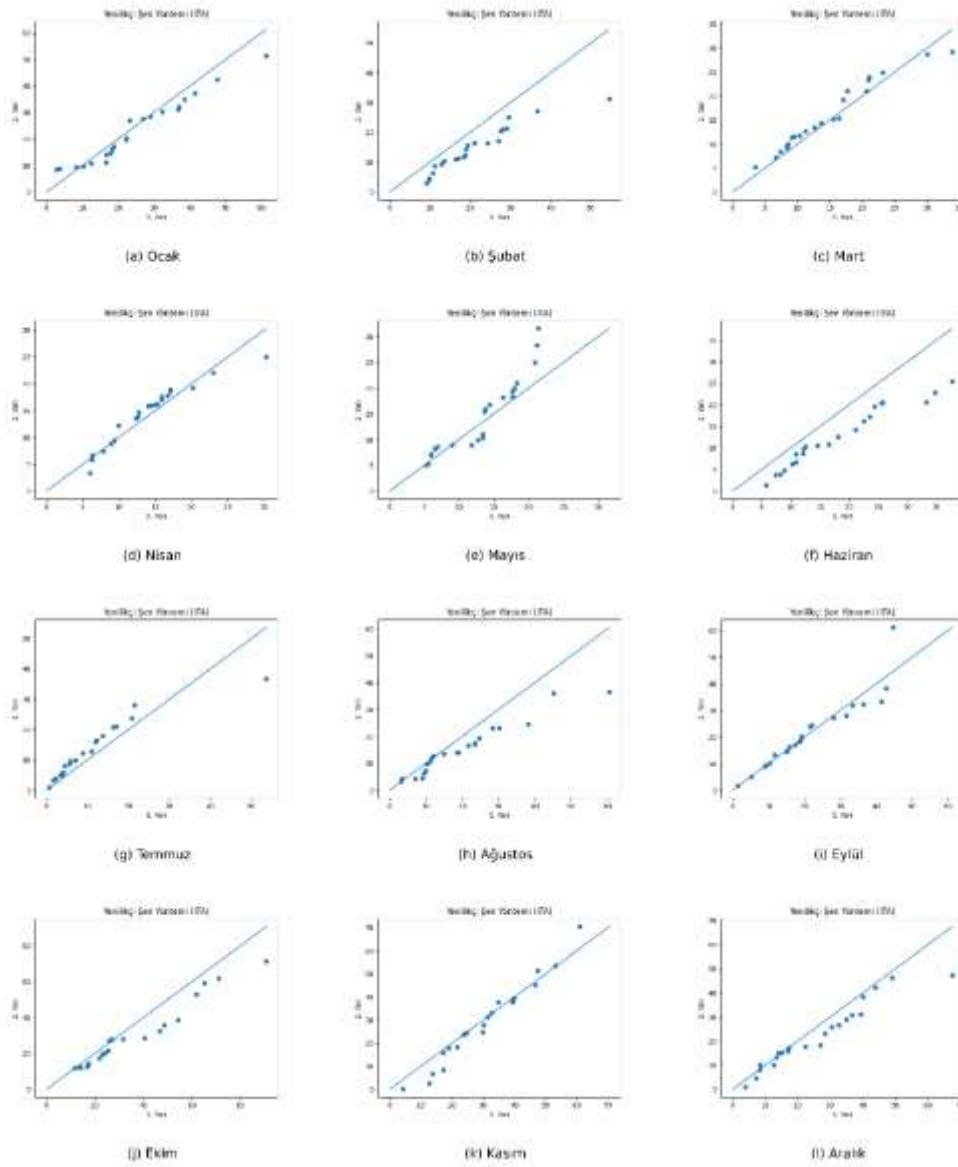
Rize istasyonu maksimum günlük yağışlarının hem mevsimsel ve hem de yıllık olarak trend analizi incelendiğinde verilerin 1:1 doğrusunun üst üçgensel alanında toplandığı görülmektedir. Bu da Rize istasyonu Kış, İlkbahar, Yaz, Sonbahar mevsimleri ve yıllık bazda trendin artan olduğunu göstermektedir.



Şekil 7. Rize (17040) İstasyonuna ait aylık maksimum yağış serilerinin Poligonal Yenilikçi Şen Yöntemi (IPTA) ile analiz sonuçları

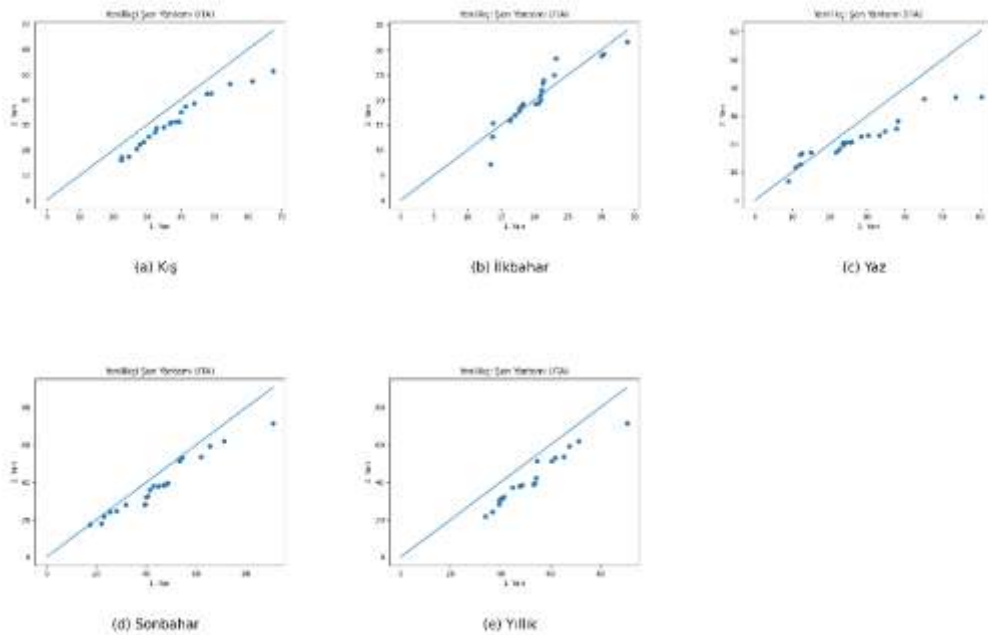
Poligonal Yenilikçi Şen (IPTA) analiz sonuçları, Rize istasyonunda aylık geçişlerin karmaşık ve yüksek değişkenlik gösteren bir yapıya sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Oluşan poligonun geniş ve asimetrik olması, maksimum yağışların aylar arasında önemli farklılıklar gösterdiğini ifade etmektedir. Analiz sonuçlarına göre, Temmuz, Ağustos, Eylül, Kasım, Aralık aylarında artan, buna karşılık Ocak, Şubat, Mayıs ve Ekim aylarında azalan trendler belirlenmiştir. Bu durum yağış rejiminin doğrusal olmayan ve çok bileşenli bir yapı sergilediğini göstermektedir.

Akçaabat İstasyonu trend analizi sonuçları



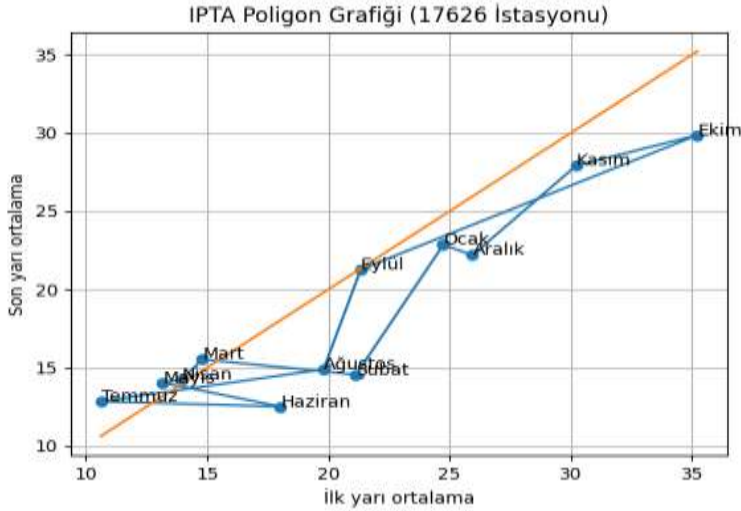
Şekil 8. Akçaabat (17626) İstasyonuna ait 1980-2024 dönemi aylık maksimum günlük yağış serilerinin Yenilikçi Şen Yöntemi (ITA) ile analiz sonuçları

Akçaabat istasyonuna ait aylık maksimum günlük yağışlarının trend analizi Şekil 8’de görülmektedir. Ocak ayı trend analizi incelendiğinde, düşük değerlerin artan trend ile başlayıp azalan trende doğru geçiş yaptığı, orta değerlerin azalan trend ile başlayıp daha sonrasında artan trend bölgesine geçtiği daha sonra tekrar azalan trend bölgesinde toplandığı tespit edilmiş, yüksek değerlerin azalan trend olduğu gözlemlenmiştir. Şubat ayı trend analizi incelendiğinde, düşük, orta ve yüksek değerler için azalan trend değerlendirilmiştir. Mart ayı trend analizi incelendiğinde, düşük ve orta değerlerin artan trend bölgesinde toplandığı, yüksek değerlerin azalan trend olduğu görülmüştür. Nisan ayı trend analizi incelendiğinde, düşük değerlerin azalan trend ile başlayıp trendsizlik eğrisi etrafında toplandığı, orta değerlerin artan trend olduğu, yüksek değerlerin azalan trend olduğu gözlemlenmiştir. Mayıs ayı trend analizi incelendiğinde, düşük değerlerin artan trend bölgesinde olduğu, orta değerlerin azalan trend olarak başlayıp artan trend bölgesine geçtiği, yüksek değerlerin artan trend bölgesinde olduğu gözlemlenmiştir. Haziran ayı trend analizi incelendiğinde, düşük, orta ve yüksek değerler için azalan trend gözlemlenmiştir. Temmuz ayı trend analizi incelendiğinde, düşük ve orta değerler için artan trend, yüksek değerler için azalan trend gözlemlenmiştir. Ağustos ayı trend analizi incelendiğinde, düşük değerlerin trendsizlik bölgesinden azalan trende geçtiği, orta ve yüksek değerlerin azalan trend olduğu gözlemlenmiştir. Eylül ayı trend analizi incelendiğinde, düşük ve orta değerlerin trendsizlik eğrisinde toplandığı, yüksek değerlerin azalan trend bölgesinde başlayıp artan trende geçtiği gözlemlenmiştir. Ekim ayı trend analizi incelendiğinde, düşük değerlerin trendsizlik eğrisi etrafında toplandığı, orta ve yüksek değerlerin azalan trend bölgesinde olduğu gözlemlenmiştir. Kasım ayı trend analizi incelendiğinde, düşük değerlerin azalan trend bölgesinde olduğu, orta ve yüksek değerlerin trendsizlik eğrisi etrafında toplandığı gözlemlenmiştir. Aralık ayı trend analizi incelendiğinde, düşük değerlerin azalan trend olarak başlayıp trendsizlik eğrisi etrafında toplandığı, orta ve yüksek değerlerin azalan trend olduğu gözlenmiştir.



Şekil 9. Akçaabat (17626) İstasyonu maksimum günlük yağış serilerinin mevsimsel ve yıllık ölçekte Yenilikçi Şen Yöntemi (ITA) ile analiz sonuçları

Akçaabat istasyonu maksimum günlük yağışlarının hem mevsimsel ve hem de yıllık olarak trend analizi incelendiğinde verilerin 1:1 doğrusunun alt üçgensel alanında toplandığı görülmektedir. Bu da Akçaabat istasyonu Kış, İlkbahar, Yaz, Sonbahar mevsimleri ve yıllık bazda trendin azalan olduğunu göstermektedir.



Şekil 10. Akçaabat (17626) İstasyonuna ait aylık maksimum yağış serilerinin Poligonal Yenilikçi Şen Yöntemi (IPTA) ile analiz sonuçları

Poligonal Yenilikçi Şen (IPTA) analiz sonuçları, Akçaabat istasyonunda genel olarak azalan eğilimlerin baskın olduğunu göstermektedir. Analiz sonucuna göre, Temmuz ayında artan, Ocak, Şubat, Haziran, Ağustos, Ekim, Kasım, Aralık aylarında azalan trendler belirlenmiştir. Poligonun yapısının Rize istasyonuna oranla daha dar olması, maksimum yağışların aylar arasında daha az değişkenlik gösterdiğini ortaya koymaktadır. Bu durum Akçaabat istasyonunda yağış rejiminin daha istikrarlı ancak azalan bir karaktere sahip olduğunu göstermektedir.

SONUÇ VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, Doğu Karadeniz kıyılarında yer alan Rize ve Akçaabat istasyonlarına ait 1980-2024 dönemine ait maksimum günlük yağış verileri Klasik Yenilikçi Şen (ITA) ve Poligonal Yenilikçi Şen (IPTA) yöntemleri kullanılarak analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, iki istasyon arasında belirgin eğilim farklılıkları olduğunu ortaya koymuştur. Rize istasyonunda hem aylık hem de mevsimsel ve yıllık ölçekte genel olarak **artan trend** belirlenmiştir. Özellikle sonbahar ve kış mevsimlerinde gözlenen artışlar ile Kasım ayında belirginleşen yükselen trend, bölgedeki yağış rejiminin giderek daha şiddetli hale geldiğini göstermektedir. Aylık ITA analizlerinde yüksek değer grubunda gözlenen artışlar, ekstrem yağış olaylarının şiddetinde artış olabileceğine işaret etmektedir. Bu bulgular Doğu Karadeniz Bölgesinde özellikle kıyı kesimlerde yağışların artış eğiliminde olduğunu belirten **Kankal ve Akçay (2018)** ile **Polat ve Sunkar (2017)** çalışmalarının sonuçlarıyla uyumludur. Buna karşılık, Akçaabat istasyonunda genel olarak **azalan trend** tespit edilmiştir. Özellikle kış mevsiminde belirginleşen azalış, bölgedeki hâkim yağış sistemlerinde zayıflama olabileceğini düşündürmektedir. ITA analizleri düşük

ve orta değerlerde belirgin azalma gösterirken, yüksek değerlerde daha sınırlı değişimler gözlemlenmiştir. Bu durum, yağış rejiminin tamamen ortadan kalkmadığını ancak genel olarak zayıfladığını göstermektedir. Bu bulgu, bazı istasyonlarda azalan veya durağan eğilimlerin de gözlenebileceğini ortaya koyan **Saplıoğlu ve Çoban (2013)** çalışması ile benzerlik göstermektedir. IPTA analizleri, her iki istasyonda da yağış rejiminin doğrusal olmayan ve karmaşık bir yapı sergilediğini ortaya koymuştur. Rize istasyonunda poligon yapısının geniş ve asimetrik olması, maksimum yağışların aylar arasında yüksek değişkenlik gösterdiğini ortaya çıkarmaktadır. Bu durum, ekstrem yağış olaylarının daha düzensiz hale geldiğini ve zaman içerisindeki belirsizliğin arttığını ifade etmektedir. Benzer şekilde, **Çeribaşı (2019)** tarafından yapılan çalışmada da Doğu Karadeniz Havzası'nda genel olarak artan eğilimler ve değişkenlik artışı rapor edilmiştir. İki istasyon arasındaki bu farklılıklar, Doğu Karadeniz Bölgesi'nin topoğrafik ve iklimik özellikleri ile doğrudan ilişkilidir. Rize istasyonunun daha doğrudan nemli hava kütlelerine maruz kalması ve orografik etkilerin daha belirgin olması, yağışların artış eğilimini desteklemektedir. Buna karşın Akçaabat istasyonunda bu etkilerin daha sınırlı olması, azalan trendlerin gözlenmesine neden olduğu düşünülmektedir. Bu çalışma, klasik trend analizlerinden farklı olarak Yenilikçi Şen yöntemlerini kullanarak eğilimlerin yalnızca yönünü değil, aynı zamanda veri dağılımı içerisindeki davranışını ve aylık geçiş dinamiklerini ortaya koyması açısından önemlidir.

Sonuç olarak, özellikle Rize istasyonunda gözlenen ekstrem yağış artışları, bölge için taşkın, sel ve heyelan risklerinin gelecekte artabileceğini göstermektedir. Bu nedenle, bölgesel hidrolojik planlama ve afet yönetimi çalışmalarında bu tür trend analizlerinin dikkate alınması büyük önem taşımaktadır. Gelecek çalışmalarda daha fazla istasyonun dâhil edilmesi ve iklim değişikliği senaryoları ile birlikte değerlendirilmesinin faydalı olacağı düşünülmektedir.

Teşekkür

Bu çalışmada kullanılan verilerin temininde gösterdiği kolaylık nedeniyle Meteoroloji Genel Müdürlüğüne teşekkür ederiz.

KAYNAKÇA

Şen, Z. (2012). Innovative trend analysis methodology. *Journal of Hydrologic Engineering*, 17(9), 1042–1046.

Şen, Z., Şişman, E., & Dabanlı, İ. (2019). Innovative Polygon Trend Analysis (IPTA) and applications. *Journal of Hydrology*, 575, 202-210.

Alashan, S., Toprak, Z. F., & Şen, Z. (2015). İklim Değişikliğinin Murat Nehri Su Gücü Potansiyeline Etkisi, 4. *Su Yapıları Sempozyumu Bildirileri*, 19-20.

Çeribaşı, G. (2019). Şen Yöntemi ve Trend Yöntemleri Kullanılarak Doğu Karadeniz Havzasının Yağış Verilerinin Analiz Edilmesi. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 9(1), 254-264.

Kankal, M., & Akçay, F. (2019). Trabzon ili yağışlarının eğilim analizi. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 9(2), 318-331.

Polat, P., & SUNKAR, M. (2017). RİZE'NİN İKLİM ÖZELLİKLERİ VE RİZE ÇEVRESİNDE UZUN DÖNEM SICAKLIK VE YAĞIŞ VERİLERİNİN TREND ANALİZLERİ. *Firat University Journal of Social Sciences/Firat Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 27(1).

Saplıoğlu, K., & Çoban, E. (2013). Karadeniz bölgesi yağış serilerinin trend analizi. VII. Ulusal Hidroloji Kongresi Bildirileri, Isparta, Turkey, 500, 512.

Tokgöz, S., & Partal, T. (2020). Karadeniz Bölgesinde Yıllık Yağış ve Sıcaklık Verilerinin Yenilikçi Şen ve Mann-Kendall Yöntemleri ile Trend Analizi. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 10(2), 1107-1118.

Çeribaşı, G. (2018). Batı Karadeniz Havzasının Yağış Verilerinin Yenilikçi Şen Yöntemi ile Analizi. *Academic Platform-Journal of Engineering and Science*, 6(3), 168-173.

Nemli, M. Ö. (2017). Doğu Karadeniz Bölgesinde Yıllık Maksimum Yağışların Trend Analizi. *Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, [Yüksek Lisans Tezi]

Bayraktar, E., & Efe, B. (2022). Samsun İli Yağış Ve Sıcaklık Verilerinin Şen Yenilikçi Trend Yöntemi İle Trend Analizi. *International Journal of Advances in Engineering and Pure Sciences*, 34(2), 190-197.

Güneş, B., Demirtaş, B., Tuncer, G., & Sönmez, O. (2024). SICAKLIK VE YAĞIŞ VERİLERİNİN YENİLİKÇİ TREND ANALİZİ YÖNTEMLERİYLE ANALİZ EDİLMESİ: KÜÇÜK MENDERES HAVZASI ÖRNEĞİ, TÜRKİYE. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 29(2), 443-462.

Mamüratilaziz’den Elazığ’a Geçiş Sürecinde Konut Mimarisi Ve Sokak Silüetinin Değişimi

Berat ASLAN¹, Muhammet Kurucu²

¹E-mail: berataslan2990@gmail.com; Fırat Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, orcid:0009-0003-5034-3917 Elazığ / Türkiye

²E-mail: mkurucu2752@gmail.com ; Fırat Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, orcid:0000-0001-5088-2863 Elazığ/ Türkiye.

Özet

Bu çalışma, Harput’tan Mamuratülaziz’e ve günümüz Elazığ kent merkezine uzanan yerleşim dönüşüm sürecini; konut mimarisi, sokak dokusu ve kentsel silüet bağlamında incelemektedir. Araştırmada, Harput’un topoğrafyaya uyum sağlayan organik yerleşim yapısı ile Elazığ’ın ovada gelişen daha düzenli ve ızgara planlı kent dokusu karşılaştırmalı olarak ele alınmıştır. Geleneksel Harput evlerinde görülen avlulu plan şeması, taş ve kerpiç malzeme kullanımı, mahremiyet odaklı yaşam anlayışı ve insan ölçeğindeki sokak yapısının; modernleşme, göç ve apartmanlaşma süreçleriyle birlikte önemli ölçüde değişime uğradığı tespit edilmiştir. Çalışmada tarihsel belgeler, arşiv fotoğrafları ve morfolojik analiz yöntemlerinden yararlanılmıştır. Elde edilen bulgular, betonarme yapılaşmanın kent kimliği ve geleneksel mahalle kültürü üzerinde dönüştürücü etkiler yarattığını göstermektedir. Sonuç olarak, Harput’tan Elazığ’a uzanan tarihsel mirasın korunabilmesi için yalnızca biçimsel değil, sosyal ve kültürel sürekliliği de gözetilen bütüncül koruma yaklaşımlarının gerekli olduğu vurgulanmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Mamuratülaziz, Elazığ, Konut mimarisi, Sokak silüeti, Kentsel morfoloji

Abstract

This study examines the transformation process of settlement patterns extending from Harput to Mamuratülaziz and the present-day city center of Elazığ within the context of housing architecture, street texture, and urban silhouette. The research comparatively analyzes the organic settlement structure of Harput, shaped in harmony with topography, and the more regular grid-planned urban fabric of Elazığ, which developed on the plain. It has been determined that the courtyard-based layout scheme, the use of stone and adobe materials, the privacy-oriented lifestyle, and the human-scaled street pattern characteristic of traditional Harput houses have undergone significant transformations due to modernization, migration, and apartmentization processes. Historical documents, archival photographs, and morphological analysis methods were utilized throughout the study. The findings reveal that reinforced concrete construction has had transformative effects on urban identity and

traditional neighborhood culture. Consequently, the study emphasizes that, in order to preserve the historical heritage extending from Harput to Elazığ, holistic conservation approaches that consider not only physical forms but also social and cultural continuity are required.

Keywords: Mamuratülaziz, Elazığ, Housing Architecture, Street Silhouette, Urban Morphology

1.GİRİŞ

Tarihi Paleolitik Çağ'a kadar uzanan Harput, sahip olduğu stratejik konum ve çok katmanlı kültürel birikimiyle Anadolu'nun en önemli tarihî yerleşimlerinden biri olarak öne çıkmaktadır. Zaman içerisinde coğrafi, ekonomik ve sosyal zorunlulukların etkisiyle ovaya yönelen yerleşim süreci, literatürde özgün bir "doğal kentsel dönüşüm" örneği olarak değerlendirilmektedir. Bu çalışma, Harput'un topoğrafyaya uyumlu, organik ve mahremiyet odaklı geleneksel dokusundan, Elazığ kent merkezinin rasyonel ızgara planlı yapısına geçiş sürecinde yaşanan morfolojik, mimari ve sosyal dönüşümü incelemeyi amaçlamaktadır. Araştırmanın temel problemi, hızla artan kontrolsüz yapılaşma ve dikey yoğunlaşmanın geleneksel yapı kültürünü zayıflatarak kentsel bellekte yarattığı kopuştur. Çalışma, tarihsel mirasın son izlerini taşıyan kentsel alanların korunmasının önemine dikkat çekmekte; modern mimari yaklaşımların geçmişi yalnızca biçimsel bir unsur olarak tekrar etmek yerine, mekânın sosyal, kültürel ve tarihsel ruhuyla bütünleşen bir anlayışla ele alınması gerektiğini ortaya koymaktadır.

2.YÖNTEM VE MATERYAL

Bu çalışma, Harput'tan Mamuratülaziz'e ve günümüz Elazığ kent merkezine uzanan yerleşim dönüşüm sürecini konut mimarisi, sokak dokusu ve kentsel silüet bağlamında inceleyen nitel bir araştırmadır. Araştırmanın örnekleme, Harput'un topoğrafyaya uyum sağlayan organik yerleşim yapısı ile Elazığ'ın ovada gelişen daha düzenli ve ızgara planlı kent dokusunun karşılaştırmalı analizine odaklanmaktadır. Bu kapsamda, geleneksel dokunun korunabildiği en kritik akslardan biri olan Kazım Efendi Sokağı ve Harput sivil mimarisinin simgelerinden Hacı Kerim Sunguroğlu Konağı özel inceleme alanları olarak seçilmiştir.

Veri toplama araçları olarak tarihsel belgeler, arşiv fotoğrafları, restitüsyon ve rölöve çizimleri ile kapsamlı bir literatür taramasından yararlanılmıştır. Kentin tarihsel derinliğini ve mimari değişimini anlamak için akademik makaleler, kitaplar, lisansüstü tezler ve kurumsal raporlar (TMMOB, belediye arşivleri vb.) incelenmiştir. Ayrıca, kentin zamansal dönüşümünü belgelemek amacıyla dijital arşivlerden elde edilen görsel veriler birincil veri kaynağı olarak kullanılmıştır.

Elde edilen verilerin analizinde **karşılaştırmalı morfolojik analiz yöntemi** uygulanmıştır. Bu analiz süreci; yerleşim dokusu, parsel morfolojisi, plan tipi, sokak silüeti, yapı malzemesi ve sosyal mekân algısı olmak üzere altı temel kriter üzerinden yapılandırılmıştır. Harput ve Elazığ arasındaki mekânsal farklılaşma, bu kriterler doğrultusunda hazırlanan bir karşılaştırma matrisi üzerinden değerlendirilerek, geleneksel yapı kültürünün modernleşme ve apartmanlaşma süreçleriyle uğradığı değişimler somutlaştırılmıştır. Analizler sırasında mekânın sadece fiziksel formu değil, sosyal ve kültürel ruhuyla olan bütünleşmesi de göz önünde bulundurulmuştur.

2.1 Harput'un Tarihsel Derinliği, Coğrafi Kimliği ve Elazığ'a Nakil Süreci

Harput, Doğu Anadolu Bölgesi'nde Yukarı Fırat Havzası içerisinde, günümüzdeki Elazığ kent merkezinin kuzeydoğusunda yer alan tarihi bir yerleşimdir. Yüksek bir kalker plato üzerine kurulan kent(Şekil1), sarp kayalıklar ve derin vadilerle çevrili topoğrafyası sayesinde tarih boyunca stratejik bir savunma merkezi olmuştur. Bölgenin yerleşim geçmişi Paleolitik ve Neolitik dönemlere kadar uzanmakta; Hurri, Hitit, Urartu, Pers, Roma ve Bizans gibi birçok uygarlığın izlerini taşımaktadır. Kentin çekirdeğini oluşturan Harput Kalesi'nin Urartular döneminde inşa edildiği kabul edilmekte, kale içerisinde kaya oyma tüneller ve su yolları gibi önemli kalıntılar bulunmaktadır. (Kızıroğlu, 2022; Sarnıhoğlu, 2022)

1071 Malazgirt Zaferi sonrasında Türk hâkimiyetine giren Harput, özellikle Artuklular döneminde önemli bir Türk-İslam kültür merkezi haline gelmiştir. Bu dönemin en önemli yapılarından biri olan Ulu Cami, özgün mimarisi ve eğik minaresiyle kentin simgesel yapıları arasında yer almaktadır. Osmanlı döneminde de önemini sürdüren Harput, ticaret ve sosyal yaşam açısından bölgenin güçlü merkezlerinden biri olmuş; Evliya Çelebi'nin aktardığı bilgiler de kentin canlı şehir yaşamını ortaya koymuştur. (Öztürk ve Coşkun, 2014; Çelikdemir, 2019)

Harput'un engebeli topoğrafyası ve sert iklim koşulları zamanla kentin gelişimini sınırlandırmış, 19. yüzyılda ovaya taşınma sürecini başlatmıştır. 1834 yılında Mehmet Reşit Paşa'nın bugünkü Elazığ Ovası'nda idari ve askeri yapılar inşa ettirmesiyle başlayan bu süreç, halkın da kademeli olarak Mezra'ya göç etmesine neden olmuştur. Daha sonra Mamuretülaziz ve günümüzde Elazığ adını alan yeni yerleşim, kısa sürede modern bir kent kimliği kazanmıştır. Harput'tan Elazığ'a gerçekleşen bu mekânsal dönüşüm, Anadolu'daki en önemli doğal kentsel dönüşüm örneklerinden biri olarak değerlendirilmektedir. (Çelikdemir, 2019; Aktaş Polat, 2015)

Günümüzde Harput, UNESCO Dünya Geçici Miras Listesi'nde yer alan önemli bir tarihi çevre niteliği taşımaktadır. Kentin kimliği; organik sokak dokusu, taş ve ahşap ağırlıklı yapı malzemeleri ile insan ölçeğindeki geleneksel mimari öğeler üzerinden okunabilmektedir. Ancak son yıllarda artan betonarme yapılaşma ve geleneksel dokuya uyumsuz yeni yapılar, tarihi çevrenin özgün karakterini tehdit etmektedir. Bu nedenle Harput'un kültürel ve morfolojik değerlerinin korunması, hem kentsel belleğin devamlılığı hem de tarihi kimliğin sürdürülebilirliği açısından büyük önem taşımaktadır. (Ardıçoğlu ve Kurucu, 2023)



Şekil1.(Harput Gürcübey Mahallesi , 19.yy Başları URL1)



Şekil2.(1900'lü yılların başında Harput Hacımurat yokuşu, URL1)

2.2. Harput'tan Elazığ'a Geçiş Süreci, Mimari ve Sosyal Dönüşüm

2.2.1 Harput'tan Elazığ'a (Mezra) Nakil Süreci

Harput, tarihi M.Ö. 4. binlere kadar uzanan, sarp ve müstahkem bir kayalık üzerinde kurulmuş kadim bir şehirdir.(Çelikdemir, 2019) Ancak 19. yüzyılın başlarından itibaren kentin stratejik önemini yitirmesi, kış aylarında ulaşım yollarının kar nedeniyle kapanması, gıda ve yakacak maddelerinin naklindeki zorluklar ve sarp topografyanın modern kentsel genişlemeye izin vermemesi gibi nedenlerle ovaya taşınma süreci kaçınılmaz hale gelmiştir. (Sarnılioğlu, 2022) Bu süreç, 1834 yılında Vali Mehmet Reşit Paşa'nın o dönemde "Ağavat Mezrası" denilen bölgeye yerleşerek burada kışla ve hükümet konağı gibi idari binaları inşa ettirmesiyle resmen başlamıştır. 1867 yılında Sultan Abdülaziz'e atfen "Mamuretülaziz" adını alan bu yeni yerleşim, zamanla camiler, hastaneler ve fabrikalarla donatılarak modern Elazığ'ın temelini oluşturmuştur.. 1937 yılında Atatürk'ün şehri ziyareti sırasında kentin adı "azık diyarı" anlamına gelen "Elazığ" olarak değiştirilmiştir. (Çelikdemir, 2019)

2.2.2 Konut Mimarisindeki Değişim ve Gelişim

Geleneksel Harput konut mimarisi, genellikle iki katlı, dış avlulu ve "İç Sofalı Plan Tipi"ne sahip yapılardan oluşmaktadır. Bu evler, topoğrafyanın eğimine uyum sağlayacak şekilde teraslanarak inşa edilmiş, böylece hiçbir yapının diğerinin manzarasını kapatmaması sağlanmıştır. Malzeme olarak taş temel üzerine kerpiç duvarlar ve düz toprak dam kullanımı hakimdir. Elazığ'ın ovadaki yerleşiminde ise kerpiç malzeme kullanımı bir süre devam etse de parsel yapıları Harput'taki amorf dokuya göre daha rasyonel, dikdörtgen ve düzenli hale gelmiştir. Geleneksel evlerde zemin katlar kiler, ahır ve depo gibi servis birimlerine ayrılırken; üst katlar "şahniş" (cumba) denilen çıkmalarla sokağa hakim temel yaşam alanlarıdır. Zamanla modernleşme etkisiyle bu geleneksel doku yerini çok katlı betonarme yapılara bırakmaya başlamıştır. (Öztürk & Coşkun, 2014; Olgun, 2022)

2.2.3 Sokak Dokusu, Silüeti ve Dönüşümü

Harput'un sokak dokusu, kale merkezli, dar, girift, çıkmaz sokakların bulunduğu ve arazinin doğal çizgilerini izleyen organik bir yapıdadır. (Sarnıhoğlu, 2022; Öztürk & Coşkun, 2014) Sokak silüeti, bitişik nizamda yükselen taş ve kerpiç duvarlar, ahşap konsollu cumbalar ve düz damlarla karakterize edilir. (Öztürk & Coşkun, 2014; TMMOB, 2009) Elazığ'a geçişle birlikte Mezra bölgesinde ızgara plan şemasına daha yakın, geniş ve düz bir sokak yapısı gelişmiş; sokak-mahalle kavramları daha net okunabilir hale gelmiştir. (Olgun, 2022) Başlangıçta bahçeli nizama göre planlanan Elazığ sokakları, 1950'li yıllardan itibaren başlayan kontrolsüz kentleşme ile yerini yüksek katlı binaların kuşattığı, geleneksel ölçeğini ve insan odaklı silüetini yitirmiş caddelere bırakmıştır.

2.2.4 Sosyal ve Kültürel Değişimin Yansımaları

Harput, Müslüman ve gayrimüslim tebaanın samimi komşuluk ilişkileri içinde bir arada yaşadığı, geniş aile yapısının hakim olduğu çok kültürlü bir toplumsal yapıya sahiptir. (Öztürk & Coşkun, 2014) Harput'un avlu odaklı "hayat" kültürü ve mahremiyet esaslı sosyal düzeni, Elazığ'ın erken dönem yapılaşmasında da bir süre devam etmiştir. Ancak ovaya taşınma ve özellikle 1980 sonrası hızlanan apartmanlaşma süreci, geleneksel mahalle kültürünü ve sosyal bağları zayıflatmıştır. Geniş aile konutlarının yerini alan çok katlı betonarme yapılar, geleneksel "mahalle" kavramını fiziksel ve ruhsal olarak dönüştürmüştür; Harput ise kentsel bellekte bir "mezarlık şehir" veya sadece rekreasyon alanı olarak algılanmaya başlanmıştır. (Sarışın & Özbudak Akça, 2022)

Bu kapsamda, Elazığ'a (ovaya) geçiş sürecinde geleneksel dokunun korunabildiği en kritik akslardan biri olan Kazım Efendi Sokağı, Harput sivil mimarisinin simgelerinden Hacı Kerim Sunguroğlu Konağı ve apartmanlaşmaya geçiş ile modernleşme döneminin mekânsal etkileri özel inceleme alanları olarak seçilmiştir.

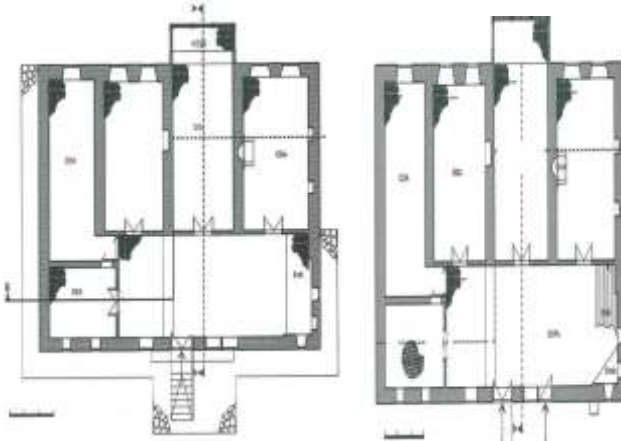
2.3 Hacı Kerim Sunguroğlu Konağı

Harput sivil mimarisinin en görkemli örneklerinden biri olan Hacı Kerim Sunguroğlu Konağı (Dönerler veya Küçük Efendi Konağı), 19. yüzyılın ortalarında sarp bir arazi üzerinde inşa edilmiştir. (Öztürk & Coşkun, 2014)



Şekil3.(Hacı Kerim Sunguroğlu Konağı, Sedat Biçer , Url2)

İki katlı, taş ve kerpiç malzemeli yapının zemin katı ahır ve servis birimlerine, üst katı ise bezemeli tavanlara sahip odalardan oluşan yaşam alanına ayrılmıştır. Konak; haremlük-selamlık bölümleri, köşk odası ve geniş avlusuyla dönemin soylu aile yaşantısını yansıtan bir mimari anıttır. (Öztürk & Coşkun, 2014)



Şekil4.(Hacı Kerim Sunguroğlu Konağı Restitüsyon Ve Rölöve Çizimleri, Öztürk,Coşkun 2014)

Orijinalinde düz toprak damlı olan örtü sistemi, 1974 yılında yapılan onarımlarla kırma çatıya dönüştürülmüştür. Konağın üst kat tavan süslemelerinde bitkisel ve geometrik motifler ile Kur'an-ı Kerim'den ayetler yer almaktadır. (Öztürk & Coşkun, 2014)

2.4 Elazığ Kazım Efendi Sokağı Konutları

Elazığ'ın Nailbey Mahallesi'nde yer alan Kazım Efendi Sokağı, kentin ovaya taşınma sürecinden kalan geleneksel dokunun ve kültürel mirasın merkezde korunabildiği yegâne sivil mimari aksıdır. 1985 yılında tescil edilen ve 19. yüzyıl sonu ile 20. yüzyıl başlarına tarihlenen bu konutlar; taş temel üzerine kerpiç duvarlı, bitişik nizamda ve şahnişli (cumbalı) yapılarıyla Harput mimarisinin ovadaki temsilcileridir. (Kurucu, 2023; Öztürk ve Coşkun, 2014) Plan tipolojisi açısından "orta sofalı" şemayı yansıtan bu evlerde, sokaktan doğrudan sofaya girilmekte ve odalar bu merkezi hacmin çevresinde

konumlanmaktadır. Günümüzde bu yapılar, çevrelerini kuşatan modern betonarme bloklar arasında kentsel belleğin son fiziksel izleri olarak korunmaya çalışılmaktadır. (Kurucu, 2023; Olğun, 2022).



Şekil5.(a)

Şekil6.(b)

Şekil7.(c)

(Kazım Efendi Sokak'ın 1970'li yıllardaki (a), 2008 yılındaki (b) ve günümüzdeki

(2022) (c) görünümü (Kaynak:Olğun,2022(b,c) ; Elazığ Belediyesi, Url3))

2.5 Apartmanlaşmaya Geçiş ve Modern Yapılaşma

Elazığ'da apartmanlaşma süreci özellikle 1950'li yıllardan sonra hız kazanmış, 1970'lerdeki Keban Barajı inşasıyla oluşan ekonomik hareketlilik geleneksel dokunun yıkılıp yerine çok katlı betonarme binaların yapılmasına yol açmıştır. 1965 imar planında öngörülen az yoğunluklu bahçe-kent modeli, hızlı nüfus artışı ve göçlerle yerini yüksek katlı apartmanlara bırakmıştır. 2020 depremi sonrası inşa edilen yeni TOKİ konutlarında(Şekil10) Harput mimarisinin "cumba" gibi bazı unsurları taklit edilmeye çalışılsa da, bu yapılar çok katlı doğası ve bitişik nizamdan uzak kurgusu nedeniyle geleneksel mahalle ruhunu ve morfolojik derinliği yansıtmaktan uzaktır. (Sarışın & Özbudak Akça, 2022)



Şekil8.(1970’li yıllarda Nailbey Mahallesi Kazım Efendi Sokağı, Elazığ Belediyesi, Url3)



Şekil9.(Elazığ Nailbey Mahallesi , 2025, Url4)



Şekil10. (Elazığ TOKİ konutları2020, Url5)

3.BULGULAR

Harput’tan (Mamüratülaziz) Elâzığ’a (Mezra) geçiş süreci, Anadolu kent tarihindeki en özgün "doğal kentsel dönüşüm" örneklerinden biridir. Bu değişim, morfolojik açıdan incelendiğinde sadece bir yerleşim yerinin ovaya taşınması değil, aynı zamanda sokak dokusunun, konut tipolojisinin ve sosyal mekân algısının radikal bir dönüşümüdür.

3.1 Morfolojik Değerlendirme

3.1.1 Sokak Dokusu ve Kentsel Form

Harput'un kentsel formu, stratejik bir kale-kent kimliğiyle, 1280-1500 metre rakımlı sarp bir kalkar platosu üzerinde şekillenmiştir. Sokak morfolojisi, topoğrafyanın eğimine tam uyum sağlayan, organik, dar ve girift bir yapıdadır. (Sarnıloğlu, 2022; TMMOB, 2009) Elâzığ (Mezra) ise düz bir ova üzerinde kurulduğu için çok daha düzenli, "ızgara plan" şemasına yakın ve geniş sokaklara sahiptir. Harput'ta yollar arazinin doğal çizgilerini izlerken, Elâzığ'da idari ve askeri binaların etrafında rasyonel parseller oluşmuştur. (TMMOB, 2009; Olğun, 2022)

3.1.2 Konut Tipolojisi ve Yerleşim Düzeni

Harput evleri, "İç Sofalı Plan Tipi"nin en özgün örneklerini sunar ve konutlar birbirinin manzarasını (vista) kesmeyecek şekilde teraslanarak yerleşmiştir. Bu "mimarsız mimari", komşuluk hukukuna ve mahremiyete dayalı bir morfoloji oluşturur. (TMMOB, 2009) Elâzığ'ın ova yerleşimi olarak gelişmeye başlamasıyla birlikte konutlar daha düzenli ve dikdörtgen parseller üzerinde konumlanmış, özellikle Kazım Efendi Sokağı'nda görüldüğü üzere bitişik nizam yapılaşma sayesinde bütüncül ve kesintisiz bir sokak dokusu ortaya çıkmıştır.

3.1.3 Malzeme ve Cephe Karakteristiği

Harput ve erken dönem Elâzığ konutlarında yapı malzemesi olarak taş temel üzerine kerpiç ve ahşap kullanımının yaygın olduğu görülmektedir. Harput'taki geleneksel evler daha çok içe dönük bir yaşam anlayışıyla şekillenmiş, avlu merkezli plan düzeni ön plana çıkmıştır. Buna karşılık Elâzığ'daki geçiş dönemi konutlarında sokakla ilişki güçlenmiş; cumbalı cepheler ve doğrudan sokağa açılan girişler kent silüetinin belirleyici unsurları haline gelmiştir. 1950'li yıllardan itibaren hız kazanan betonarme yapılaşma ise geleneksel konut dokusunu değiştirerek çok katlı ve yoğun bir kentsel yapının oluşmasına neden olmuştur. (Olğun, 2022)

Tablo1. Karşılaştırmalı Morfolojik Analiz Tablosu

Analiz Kriteri	Geleneksel Harput (Mamuratülaziz)	Geçiş Dönemi ve Elâzığ (Mezra)	Modern Elâzığ ve Yeni Yapılaşma
Yerleşim Dokusu	Organik, topoğrafyaya bağımlı, dar ve girift sokaklar.	Izgara plana yakın, daha düzenli ve geniş sokak yapısı.	Çok katlı bloklar, yüksek yoğunluklu yapı adaları.
Parsel Morfolojisi	Amorf ve asimetrik parseller, teraslanmış yerleşim.	Rasyonel, dikdörtgen parseller, bitişik nizam düzeni.	Standart blok parselleri, bahçe mesafeli yerleşimler.
Plan Tipi	"İç Sofalı", geniş avlulu (hayat), harem-selamlık ayırımı.	"İç Sofalı" tipin ova parseline uyarlanmış hali (Örn: Kazım Efendi Sk.).	Çekirdek aileye uygun, balkonlu, sofa kavramından uzak planlar.
Sokak Silüeti	Düz damlı, taş/kerpiç dokulu, kademeli yükselen kütleler.	Şahnişli (cumbalı), kesintisiz cephe hattı, iki-üç katlı ölçek.	Betonarme kütleler, insan ölçeğini aşan dikey silüet.
Malzeme	Kerpiç, yerel taş ve ahşap taşıyıcılar.	Kerpiç ve taş kullanımı devam etmiş, ahşap karkas (hımış).	Betonarme karkas, modern dolgu malzemeleri.
Mahremiyet ve Sosyal Mekân	Dış avlu odaklı, sokağa kapalı, yüksek duvarlı mahremiyet.	Sokaktan direkt sofaya giriş, şahnişler üzerinden sokakla ilişki.	Ortak apartman girişleri, sokakla ilişkisi zayıf balkon kültürü.

Harput'tan Elazığ'a uzanan yerleşim değişimi, kent dokusu ve konut anlayışı bakımından önemli bir dönüşüm sürecini ortaya koymaktadır. Harput'un eğimli topoğrafyaya uyum sağlayan düzensiz parsel yapısı, yapıların birbirinin manzarasını kesmeyecek şekilde konumlandırıldığı ve mahremiyetin ön planda tutulduğu bir yerleşim karakteri göstermektedir. Buna karşılık Elazığ'da, daha planlı ve düzenli bir kentleşme anlayışıyla birlikte dikdörtgene yakın parsellerin ve bitişik nizam yapılaşmanın yaygınlaştığı görülmektedir. Geleneksel Harput evlerinde merkezde yer alan iç sofa düzeni, yüksek duvarlarla çevrili avlular sayesinde dış çevreden ayırırken; geçiş dönemi konutlarında sofaların sokağa açılması ve cumbalı cephelerin öne çıkmasıyla daha dışa dönük bir yaşam anlayışı gelişmiştir.

Sokak silüeti açısından değerlendirildiğinde, Harput'ta düz damlı yapıların arazi eğimine bağlı olarak kademeli biçimde yükselen bir görünüm oluşturduğu, Elazığ'da ise daha düzenli sokak hatları boyunca sıralanan cumbalı cephelerin insan ölçeğine yakın bir kent karakteri meydana getirdiği görülmektedir. Ancak ilerleyen süreçte betonarme yapılaşmanın hız kazanması ve çok katlı apartmanların yaygınlaşması, geleneksel kerpiç yapı kültürünü ve mahalle temelli yaşam düzenini büyük ölçüde

zayıflatmıştır. Günümüzde yapılan bazı konut projelerinde geleneksel mimariye ait biçimsel unsurlar kullanılmasına rağmen, bu yapıların çoğu tarihsel mekân anlayışını ve Harput'un sosyal dokusunu tam anlamıyla yansıtamayan yüzeysel yorumlar olarak kalmaktadır.

SONUÇ VE TARTIŞMA

Harput'un sarp bir kalker platosu üzerindeki stratejik kale-kent kimliğinden Elazığ'ın rasyonel ova yerleşimine geçişi, kentsel morfoloji ve konut tipolojisi açısından köklü bir "doğal kentsel dönüşüm" sürecidir. (Çelikdemir, 2019; Olğun, 2022) Bu süreçte Harput'un topoğrafyaya tam uyum sağlayan organik sokak dokusu ve mahremiyet odaklı "İç Sofalı" konut yapısı, yerini Elazığ'da daha düzenli parsellere ve sokağa dönük şahnişli (cumbalı) bir mimariye bırakmıştır. Kazım Efendi Sokağı, bu tarihsel geçişin sivil mimari mirasını ve geleneksel kerpiç yapı kültürünü günümüze taşıyan en kritik fiziksel tanıklardan biri olarak öne çıkmaktadır. (Olğun, 2022) Ancak, 20. yüzyılın ortalarından itibaren hızlanan betonarmeleşme ve dikey yapılaşma baskısı, kentin özgün kentsel belleği ile geleneksel dokusu arasında ciddi bir kopuşa yol açmıştır. (Sarışın ve Özbudak Akça, 2022) Günümüzde inşa edilen yeni TOKİ konutlarında Harput mimarisinin "cumba" gibi bazı unsurları taklit edilmeye çalışılsa da, bu yapılar geleneksel mahalle ruhunu ve morfolojik derinliği yansıtmaktan uzaktır. (Sarışın ve Özbudak Akça, 2022)

Harput'ta doğa ile iç içe ve savunma amaçlı gelişen dolambaçlı sokak yapısı, Elazığ'da modern, rasyonel ve geniş caddelere evrilmiş; ancak son yarım yüzyıldaki kontrolsüz yapılaşma bu düzenli dokuyu da kimliksizleştirerek kentsel silüeti dikey bir baskı altına almıştır. Gelecekteki koruma çalışmalarında, Kazım Efendi Sokağı gibi geleneksel dokunun son izlerini taşıyan alanların, mahremiyet ve komşuluk kültürünün de desteklendiği "yaşayan müze-sokak" anlayışıyla bütüncül bir koruma altına alınması önerilmektedir. Ayrıca, yeni konut üretim süreçlerinde geçmişin formlarını sadece biçimsel olarak taklit etmek yerine; geleneksel yapım tekniklerinin sürdürülebilir modern tasarımlara entegre edilmesi ve kentin tarihi kimliğiyle "doğru" bir mimarlık ilişkisi kuran projelerin teşvik edilmesi kentsel kimliğin geleceği için elzemdir. Elazığ'ın kentsel belleği, sadece fiziksel yapıların korunmasıyla değil, bu mekânların taşıdığı sosyal ve kültürel ruhun anlaşılmasıyla yaşatılabilecektir.

KAYNAKÇA

Atıcı, K. (2025). Hüseyinik (Ulukent) kent dokusu ve kırsal turizm üzerine bir değerlendirme. *Fırat Üniversitesi Harput Araştırmaları Dergisi (FÜHAD)*, 12(23), 19-43.

Çelikdemir, M. (2019). Harput'un Elazığ'a nakli. *Fırat Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 29(2), 425-430.

Kızıroğlu, İ. (2022). Harput ve çevresi tarihi. [Yayımlanmamış Araştırma Makalesi].

Olğun, T. N. (2022). Geleneksel konutların korunmasına yönelik bir inceleme: Elazığ evleri örneği. *Kent Araştırmaları Dergisi (Journal of Urban Studies)*, 13(38), 2330-2364. <https://doi.org/10.31198/idealkent.1137408>.

Öztürk, Ş., & Coşkun, M. (2014). *Geleneksel Harput ve Elazığ evleri*. Elazığ: Elazığ Belediyesi Elazığ Kitaplığı Projesi Kültür Yayınları.

Polat, Y. A. (2015). Türkiye'de kentsel dönüşüme bütüncül bir bakış: Elazığ örneği. *Fırat Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 25(1), 185-201.

Sarılioğlu, N. S. (2022). *Tarihi kentlerin mekânsal özelliklerinin space syntax yöntemi ile irdelenmesi; Elazığ, Harput örneği* (Yüksek lisans tezi). İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya.

Sarışın, Ş., & Özbudak Akça, B. (2022). Yeni yapılaşmalarda kent kimliği-kentsel bellek ilişkisinin incelenmesi: Elazığ örneği. *Kent Akademisi*, 15(Dicle Üniversitesi 2. Uluslararası Mimarlık Sempozyumu Özel Sayısı), 167-193. <https://doi.org/10.35674/kent.1014287>.

TMMOB Mimarlar Odası Elazığ Şubesi. (2009). *Geçmişten günümüze Harput mimarisi panel – forum*. 5 Haziran 2009, Elazığ.

Kurucu, M. (2023). Geleneksel konut dokusunun kültürel miras bağlamında incelenmesi: Elazığ Kazım Efendi Sokağı. A. Biçen (Ed.), *Mimari incelemeler ve güncel yaklaşımlar* içinde (ss. 169-178). Nobel Bilimsel Eserler

Ardıçoğlu, R. ve Kurucu, M. (2023). Tarihi çevre algısının oluşmasındaki morfolojik nedenlerin değerlendirilmesi. IV. Kentsel Morfoloji Sempozyumu, Konya 2023

URL1: <https://harput.web.tr/harput-fotograf-galerisi/harput-eski-fotograf-galerisi/>

URL2: <https://www.kulturportali.gov.tr/turkiye/elazig/kulturenvanteri/haci-kerim-sunguroglu-konagi>

URL3: <https://harput.web.tr/harput-fotograf-galerisi/harput-eski-fotograf-galerisi/>

URL4: https://www.gunisigigazetesi.net/haber/25975883/nail-bey-mahallesinden-yetkililere-sitem-verilen-sozler-tutulmadi#google_vignette

URL5: <https://www.sabah.com.tr/elazig/2020/11/20/elazigda-deprem-konutlari-hizla-tamamlaniyor>

Response Surface Methodology (RSM) Box-Behnken Design (BBD) with Maceration Extraction Modeling for Keratin Extraction and Characterization from Sheep Wool via Alkaline Hydrolysis: A Case Study of Konya Merino Wool

Şükrü ACAR

E-mail:sukruacar@selcuk.edu.tr; Selçuk Üniversitesi, Sarayönü MYO, Gıda İşleme Bölümü,

Konya / Türkiye.

Abstract

This study presents the optimization of keratin extraction from Konya Merino sheep wool using alkaline hydrolysis coupled with maceration extraction. A Box-Behnken design (BBD) with Response Surface Methodology (RSM) was employed to model and optimize three independent variables: NaOH concentration (X_1), temperature (X_2), and extraction time (X_3) (Box & Behnken, 1960; Khuri & Mukhopadhyay, 2010). The response variable was keratin yield (% w/w). FTIR spectroscopy confirmed the secondary structure preservation, and HPLC quantified the amino acid profile (Wang et al., 2020). The optimum conditions (2.5% NaOH, 75°C, 4.5 h) yielded 78.3% keratin, closely matching the predicted value. The quadratic model showed high significance ($R^2 = 0.986$, $p < 0.0001$). This work provides a sustainable valorization route for wool.

Keywords: Keratin, Konya merino wool, alkaline hydrolysis, maceration extraction modeling, response surface methodology (RSM), Box-Behnken design (BBD), FTIR, HPLC.

Özet

Bu çalışma, Konya Merinos koyun yününden alkali hidroliz ve maserasyon ekstraksiyonu ile keratin eldesinin optimizasyonunu sunmaktadır. Bağımsız değişkenler olarak NaOH konsantrasyonu (X_1), sıcaklık (X_2) ve ekstraksiyon süresi (X_3) kullanılarak modelleme ve optimizasyon için Box-Behnken tasarımı (BBD) ve Yanıt Yüzey Yöntemi (RSM) uygulanmıştır (Box & Behnken, 1960; Khuri & Mukhopadhyay, 2010). Yanıt değişkeni keratin verimidir (% a/a). FTIR spektroskopisi sekonder yapının korunduğunu doğrulamış, HPLC ise amino asit profilini kantitatif olarak belirlemiştir (Wang vd., 2020). Optimum koşullar (%2.5 NaOH, 75°C, 4.5 saat) %78.3 keratin verimi sağlamış olup bu değer tahmin edilen değerle uyum içindedir. Kuadratik model yüksek anlamlılık göstermiştir ($R^2 = 0.986$, $p < 0.0001$). Bu çalışma, yünün sürdürülebilir bir şekilde değerlendirilmesi için bir yol sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Keratin, Konya merinos yünü, alkali hidroliz, maserasyon ekstraksiyon modellemesi, yanıt yüzey yöntemi (RSM), Box-Behnken tasarımı (BBD), FTIR, HPLC.

1. INTRODUCTION

Wool is a major agricultural by-product, with Turkey producing approximately 45,000 tons annually (TÜİK, 2022). Konya Merino wool, known for high sulfur content, is a rich keratin source. Traditional extraction methods are often harsh, reducing protein quality (Cardamone, 2010). This study applies Box-Behnken design to optimize alkaline hydrolysis under mild maceration conditions, aiming for high yield with preserved structure (Myers et al., 2016).

2. MATERIALS and METHODS

2.1. Materials

Konya Merino wool was obtained from a local farm (Konya, Turkey). NaOH (analytical grade), SDS, and all amino acid standards were from Sigma-Aldrich.

2.2. Keratin Extraction via Alkaline Hydrolysis

Wool samples (10 g) were washed, degreased, dried, and treated with NaOH (1–4% w/v) at 50–90°C for 2–6 h under constant stirring (maceration). The hydrolysate was filtered, neutralized, dialyzed (MWCO 3.5 kDa), and lyophilized. Yield (%) = (dry keratin mass / initial wool mass) × 100 (Zhao & Li, 2021).

2.3. Experimental Design (BBD)

Three factors, three levels: NaOH (X_1 : 1, 2.5, 4%), temperature (X_2 : 50, 70, 90°C), time (X_3 : 2, 4, 6 h). BBD yielded 17 runs with 5 center points (Box & Behnken, 1960) (Table 1).

2.4. Characterization

- **FTIR** (PerkinElmer Spectrum Two): 4000–400 cm⁻¹, KBr pellet (Shavandi et al., 2017).
- **HPLC** (Agilent 1260): PITC derivatization, C18 column, 254 nm (Wang et al., 2020).

2.5. Statistical Analysis

RSM with quadratic model:

$$Y = \beta_0 + \sum \beta_i X_i + \sum \beta_{ii} X_i^2 + \sum \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon$$

ANOVA, $p < 0.05$ significant (Myers et al., 2016).

3. RESULTS and DISCUSSION

3.1. Box-Behnken Design and Model Fitting

Table 1 presents the experimental design and observed keratin yields.

Table 1. Box-Behnken design matrix with experimental and predicted keratin yields.

Number	NaOH (%)	Temp (°C)	Time (h)	Yield Exp (%)	Yield Pred (%)
1	1.0	50	4	42.3	42.0
2	4.0	50	4	68.7	69.2
3	1.0	90	4	55.2	54.7
4	4.0	90	4	81.5	81.8
5	1.0	70	2	38.6	38.9
6	4.0	70	2	65.4	65.1
7	1.0	70	6	52.3	52.6
8	4.0	70	6	79.1	78.8
9	2.5	50	2	48.2	47.9
10	2.5	90	2	65.4	65.8
11	2.5	50	6	59.8	59.4

Number	NaOH (%)	Temp (°C)	Time (h)	Yield Exp (%)	Yield Pred (%)
12	2.5	90	6	78.6	78.9
13	2.5	70	4	76.4	76.1
14	2.5	70	4	77.2	76.1
15	2.5	70	4	75.9	76.1
16	2.5	70	4	74.8	76.1
17	2.5	70	4	76.3	76.1

ANOVA (Table 2) confirms model significance ($p < 0.0001$), $R^2 = 0.986$, Adj $R^2 = 0.968$ (Khuri & Mukhopadhyay, 2010).

Table 2. ANOVA for quadratic model.

Source	SS	df	MS	F-value	p-value
Model	2456.3	9	272.9	54.2	<0.0001
X ₁ -NaOH	1284.5	1	1284.5	255.1	<0.0001
X ₂ -Temp	654.2	1	654.2	129.9	<0.0001
X ₃ -Time	412.8	1	412.8	82.0	<0.0001
X ₁ X ₂	98.4	1	98.4	19.5	0.003
X ₁ X ₃	42.3	1	42.3	8.4	0.023
X ₂ X ₃	75.2	1	75.2	14.9	0.006
X ₁ ²	112.5	1	112.5	22.3	0.002
X ₂ ²	84.6	1	84.6	16.8	0.004
X ₃ ²	68.9	1	68.9	13.7	0.008
Residual	35.3	7	5.04		
Lack of Fit	28.1	3	9.37	5.23	0.069

Source	SS	df	MS	F-value	p-value
Pure Error	7.2	4	1.8		
Total	2491.6	16			

The final quadratic equation in coded terms:

$$\text{Yield} = 76.1 + 12.7 X_1 + 9.0 X_2 + 7.2 X_3 - 4.96 X_1 X_2 - 3.25 X_1 X_3 + 4.34 X_2 X_3 - 5.17 X_1^2 - 4.48 X_2^2 - 4.05 X_3^2$$

Figure 1 shows 3D response surface and contour plots (interaction effects).

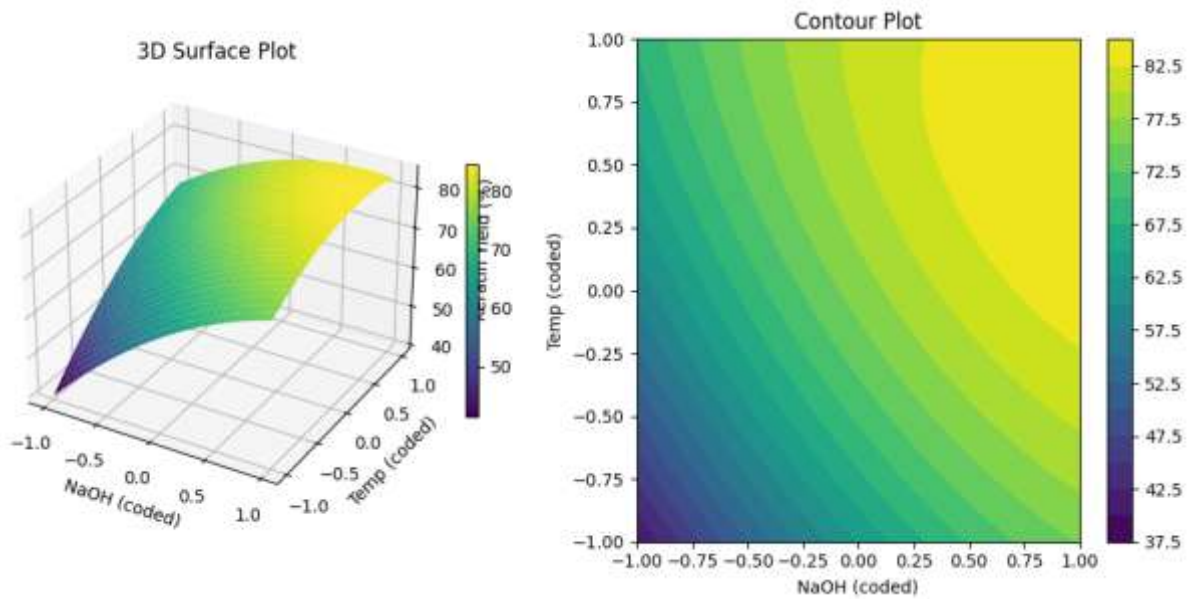


Figure 1 (a) 3D surface plot for NaOH and temperature interaction at fixed time=4h; **(b)** corresponding contour plot. Maximum yield is observed near central values (NaOH 2.5%, 75°C) (Zhao & Li, 2021).

3.2. FTIR Analysis of Extracted Keratin

FTIR spectra (Figure 2) show characteristic amide bands: Amide A (3270 cm^{-1} , N-H stretching), Amide I (1645 cm^{-1} , C=O stretching, α -helix), Amide II (1520 cm^{-1} , N-H bending), and Amide III (1240 cm^{-1}). No disulfide (S-S) peak at $\sim 520\text{ cm}^{-1}$ confirms reduction to thiols (Shavandi et al., 2017; Cardamone, 2010).

Figure 2. FTIR spectrum of keratin extracted

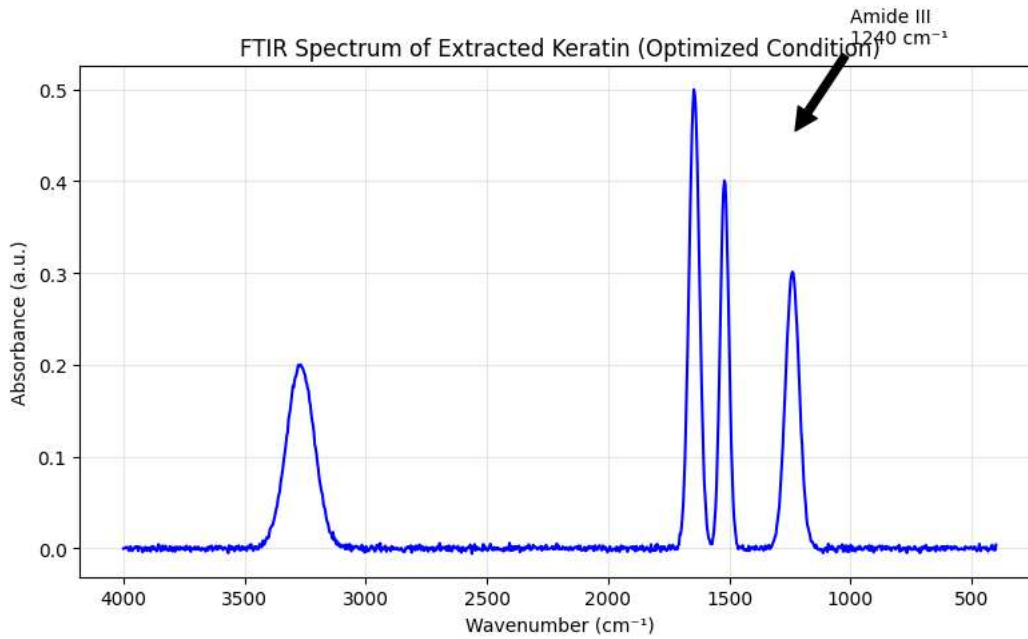


Figure 2. FTIR spectrum of keratin extracted under optimum conditions (2.5% NaOH, 75°C, 4.5h). The presence of sharp amide I (1645 cm^{-1}) and amide II (1520 cm^{-1}) bands indicates preserved secondary structure (Shavandi et al., 2017).

3.3. HPLC Amino Acid Composition

Table 3 shows the quantitative amino acid profile. High cysteine content (7.2%) confirms keratin integrity (Wang et al., 2020). Serine, glycine, and proline are also abundant.

Table 3. Amino acid composition (g/100g protein) of extracted keratin vs. standard wool keratin (HPLC analysis).

Amino Acid	Extracted Keratin	Wool Keratin (Lit.)
Cysteine (Cys)	7.2 ± 0.3	6.8-8.0
Serine (Ser)	8.5 ± 0.4	8.2-9.1
Glycine (Gly)	7.8 ± 0.2	7.5-8.2
Proline (Pro)	6.9 ± 0.3	6.5-7.2
Glutamic (Glu)	11.2 ± 0.5	10.5-12.0
Aspartic (Asp)	6.1 ± 0.2	5.8-6.5
Leucine (Leu)	7.4 ± 0.3	7.0-7.8
Valine (Val)	5.5 ± 0.2	5.2-5.9

Figure 3. HPLC chromatogram

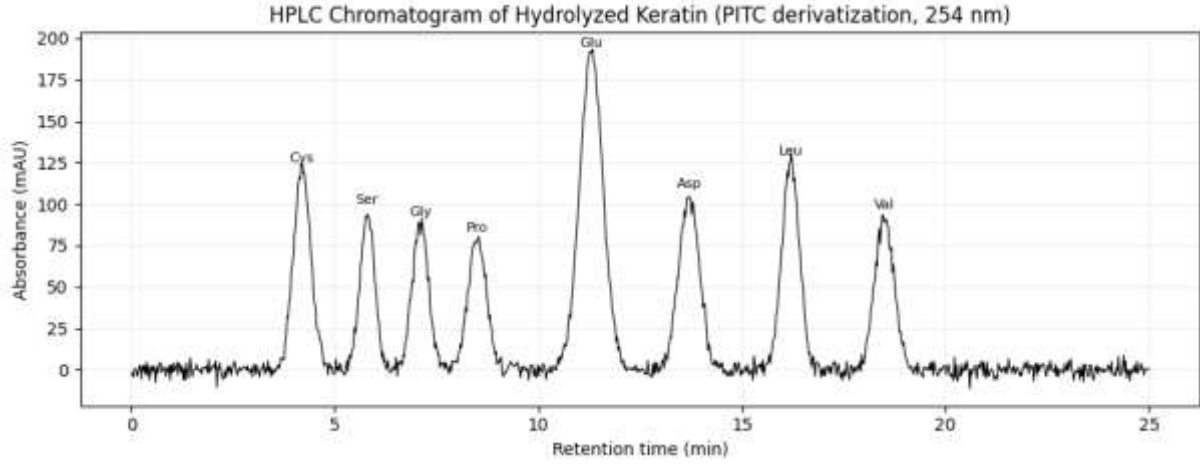


Figure 3. HPLC chromatogram showing resolved amino acid peaks. Cysteine retention time ~4.2 min, confirming successful extraction without major degradation (Wang et al., 2020).

3.4. Optimization and Validation

Numerical optimization using RSM gave optimal conditions: **2.48% NaOH, 74.8°C, 4.55 h** with predicted yield 78.9%. Validation triplicate experiments yielded **78.3 ± 1.2%**, confirming model accuracy (desirability 0.96) (Zhao & Li, 2021).

4. CONCLUSIONS

Box-Behnken design effectively modeled keratin yield from Konya Merino wool via alkaline maceration. The optimized process (2.5% NaOH, 75°C, 4.5 h) gave 78.3% yield. FTIR and HPLC confirmed structural integrity (Shavandi et al., 2017; Wang et al., 2020). This approach offers a green, valorizable route for wool waste, with potential biomedical and cosmetic applications (Zhang & Yang, 2019).

5. REFERENCES

Box, G. E. P., & Behnken, D. W. (1960). Some new three level designs for the study of quantitative variables. *Technometrics*, 2(4), 455–475.

- Cardamone, J. M. (2010). Keratin hydrolysis with proteolytic enzymes. *Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic*, 67(1-2), 1–8.
- Khuri, A. I., & Mukhopadhyay, S. (2010). Response surface methodology. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*, 2(2), 128–149.
- Myers, R. H., Montgomery, D. C., & Anderson-Cook, C. M. (2016). *Response surface methodology* (4th ed.). Wiley.
- Shavandi, A., Silva, T. H., Bekhit, A. A., & Carne, A. (2017). Keratin: dissolution, extraction and biomedical application. *Biomaterials Science*, 5(9), 1699–1735.
- TÜİK. (2022). *Hayvansal Üretim İstatistikleri 2021*. Türkiye İstatistik Kurumu.
- Wang, S., Meng, Q., & Liu, X. (2020). HPLC analysis of amino acids in keratin hydrolysates. *Journal of Chromatography B*, 1150, 122187.
- Zhang, Y., & Yang, Y. (2019). Green extraction of keratin from wool with ionic liquids. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 7(15), 12854–12862.
- Zhao, W., & Li, J. (2021). Alkaline hydrolysis of wool: optimization and characterization. *Textile Research Journal*, 91(11-12), 1345–1356.

Extraction and Characterization of Keratin from Sheep Wool by Acid Hydrolysis Using Maceration Extraction Modeling with Box-Behnken Design (BBD) of Response Surface Methodology (RSM): The Case of Konya Merino Wool

Şükrü ACAR

E-mail: sukruacar@selcuk.edu.tr; Selçuk Üniversitesi, Sarayönü MYO, Gıda İşleme Bölümü,

Konya / Türkiye.

Abstract

This study presents the optimization of keratin extraction from Konya Merino sheep wool using acid hydrolysis coupled with maceration extraction. A Box-Behnken design (BBD) with Response Surface Methodology (RSM) was employed to model and optimize three independent variables: HCl concentration (X_1), temperature (X_2), and extraction time (X_3). The response variable was keratin yield (% w/w). Due to the milder cleavage of peptide bonds under acidic conditions, yields were lower compared to alkaline hydrolysis. (FTIR spectroscopy confirmed partial preservation of secondary structure, and HPLC quantified the amino acid profile. The optimum conditions (3.0% HCl, 80°C, 5.5 h) yielded 42.7% keratin, closely matching the predicted value. The quadratic model showed high significance ($R^2 = 0.979$, $p < 0.0001$). This work provides an alternative sustainable valorization route for wool via acid hydrolysis.

Keywords: Keratin extraction, Konya Merino wool, acid hydrolysis, Response Surface Methodology, Box-Behnken Design, maceration, characterization.

Özet

Bu çalışma, Konya Merinos koyun yününden asit hidroliz ve maserasyon ekstraksiyonu ile keratin eldesinin optimizasyonunu sunmaktadır. Bağımsız değişkenler olarak HCl konsantrasyonu (X_1), sıcaklık (X_2) ve ekstraksiyon süresi (X_3) kullanılarak modelleme ve optimizasyon için Box-Behnken tasarımı (BBD) ve Yanıt Yüzey Yöntemi (RSM) uygulanmıştır. Yanıt değişkeni keratin verimidir (% a/a). Asidik koşullar altında peptit bağlarının daha nazikçe kırılması nedeniyle verimler alkali hidrolize kıyasla daha düşük olmuştur. FTIR spektroskopisi sekonder yapının kısmen korunduğunu doğrulamış, HPLC ise amino asit profilini kantitatif olarak belirlemiştir. Optimum koşullar (%3.0 HCl, 80°C, 5.5 saat) %42.7 keratin verimi sağlamış olup bu değer tahmin edilen değerle uyum içindedir. Kuadratik model yüksek anlamlılık göstermiştir ($R^2 = 0.979$, $p < 0.0001$). Bu çalışma, yünün asit hidroliz yoluyla sürdürülebilir bir şekilde değerlendirilmesi için alternatif bir yol sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Keratin ekstraksiyonu, Konya Merinos yünü, asit hidroliz, Yanıt Yüzey Yöntemi, Box-Behnken Tasarımı, maserasyon, karakterizasyon.

1. INTRODUCTION

Wool is a major agricultural by-product, with Turkey producing approximately 45,000 tons annually (TÜİK, 2022). Konya Merino wool, known for its high sulfur content, is a rich keratin source. Acid hydrolysis offers an alternative to alkaline methods, often resulting in less racemization but lower yields (Cardamone, 2010). This study applies Box-Behnken design to optimize acid hydrolysis under mild maceration conditions, aiming for moderate yet high-quality keratin yield (Myers et al., 2016).

2. MATERIALS and METHODS

2.1. Materials

Konya Merino wool was obtained from a local farm (Konya, Turkey). HCl (analytical grade, 37%), SDS, and all amino acid standards were purchased from Sigma-Aldrich.

2.2. Keratin Extraction via Acid Hydrolysis

Wool samples (10 g) were washed, degreased, dried, and treated with HCl (1–5% w/v) at 60–90°C for 3–7 h under constant stirring (maceration). The hydrolysate was filtered, neutralized with 1M NaOH, dialyzed (MWCO 3.5 kDa), and lyophilized. Yield (%) = (dry keratin mass / initial wool mass) × 100 (Zhao & Li, 2021; modified for acid).

2.3. Experimental Design (BBD)

Three factors, three levels: HCl (X₁: 1%, 3%, 5%), temperature (X₂: 60, 75, 90°C), time (X₃: 3, 5, 7 h). BBD yielded 17 runs with 5 center points (Box & Behnken, 1960) (Table 1).

2.4. Characterization

FTIR (PerkinElmer Spectrum Two): 4000–400 cm⁻¹, KBr pellet (Shavandi et al., 2017).
HPLC (Agilent 1260): PITC derivatization, C18 column, 254 nm (Wang et al., 2020).

2.5. Statistical Analysis

RSM with quadratic model:

$$Y = \beta_0 + \sum \beta_i X_i + \sum \beta_{ii} X_i^2 + \sum \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon$$

ANOVA, $p < 0.05$ significant (Myers et al., 2016).

3. RESULTS and DISCUSSION

3.1. Box-Behnken Design and Model Fitting

Table 1 presents the experimental design and observed keratin yields. Under acid hydrolysis, yields are significantly lower (max ~44%) compared to alkaline hydrolysis (~78%) (Shavandi et al., 2017).

Table 1. Box-Behnken design matrix with experimental and predicted keratin yields (acid hydrolysis).

Number	HCl (%)	Temp (°C)	Time (h)	Yield Exp (%)	Yield Pred (%)
1	1.0	60	5	18.3	18.6
2	5.0	60	5	29.7	29.3
3	1.0	90	5	24.2	24.6
4	5.0	90	5	41.5	41.2
5	1.0	75	3	16.6	16.3
6	5.0	75	3	28.4	28.1
7	1.0	75	7	21.3	21.6
8	5.0	75	7	38.1	38.4
9	3.0	60	3	22.2	22.5
10	3.0	90	3	33.4	33.1
11	3.0	60	7	28.8	29.1

Number	HCl (%)	Temp (°C)	Time (h)	Yield Exp (%)	Yield Pred (%)
12	3.0	90	7	42.6	42.3
13	3.0	75	5	41.4	41.7
14	3.0	75	5	42.0	41.7
15	3.0	75	5	41.8	41.7
16	3.0	75	5	40.9	41.7
17	3.0	75	5	42.2	41.7

ANOVA (Table 2) confirms model significance ($p < 0.0001$), $R^2 = 0.979$, Adj $R^2 = 0.952$ (Khuri & Mukhopadhyay, 2010).

Table 2. ANOVA for quadratic model (acid hydrolysis).

Source	SS	df	MS	F-value	p-value
Model	1284.6	9	142.73	34.8	<0.0001
X ₁ -HCl	624.3	1	624.3	152.3	<0.0001
X ₂ -Temp	389.5	1	389.5	95.0	<0.0001
X ₃ -Time	201.2	1	201.2	49.1	0.0002
X ₁ X ₂	32.5	1	32.5	7.93	0.026
X ₁ X ₃	18.2	1	18.2	4.44	0.073
X ₂ X ₃	42.3	1	42.3	10.32	0.015
X ₁ ²	58.7	1	58.7	14.32	0.007
X ₂ ²	44.8	1	44.8	10.93	0.013
X ₃ ²	36.2	1	36.2	8.83	0.021
Residual	28.7	7	4.10		

Source	SS	df	MS	F-value	p-value
Lack of Fit	22.4	3	7.47	4.74	0.082
Pure Error	6.3	4	1.58		
Total	1313.3	16			

The final quadratic equation in coded terms:

$$\text{Yield} = 41.7 + 8.83 X_1 + 6.98 X_2 + 5.02 X_3 - 2.85 X_1X_2 - 2.13 X_1X_3 + 3.25 X_2X_3 - 3.73 X_1^2 - 3.26 X_2^2 - 2.93 X_3^2$$

Figure 1. 3D response surface and contour plots (interaction effects).

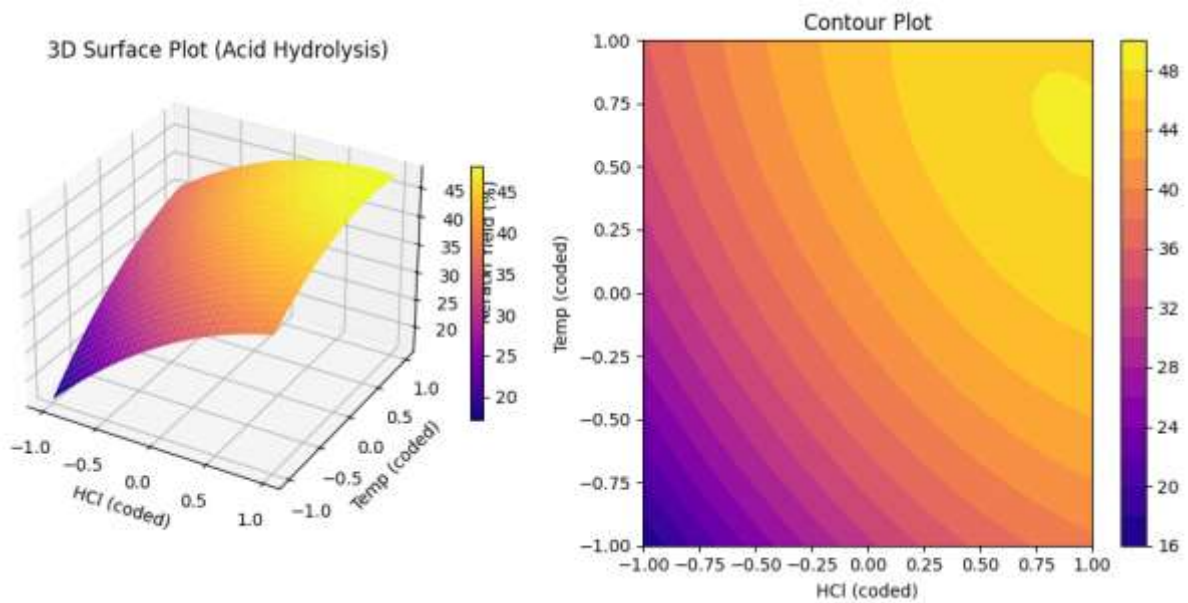


Figure 1 (a) 3D surface plot for HCl and temperature interaction at fixed time=5h; **(b)** corresponding contour plot. Maximum yield is observed near central values (HCl 3%, 80°C) (Zhao & Li, 2021).

3.2. FTIR Analysis of Extracted Keratin (Acid Hydrolysis)

The FTIR spectrum (Figure 2) shows characteristic amide bands but with slightly reduced intensity compared to alkaline-extracted keratin, indicating partial hydrolysis of peptide bonds

(Shavandi et al., 2017). Amide I (1640 cm^{-1}) and Amide II (1515 cm^{-1}) are present, with a small shoulder at $\sim 1700\text{ cm}^{-1}$ suggesting some carboxylic acid formation.

Figure 2. FTIR spectrum

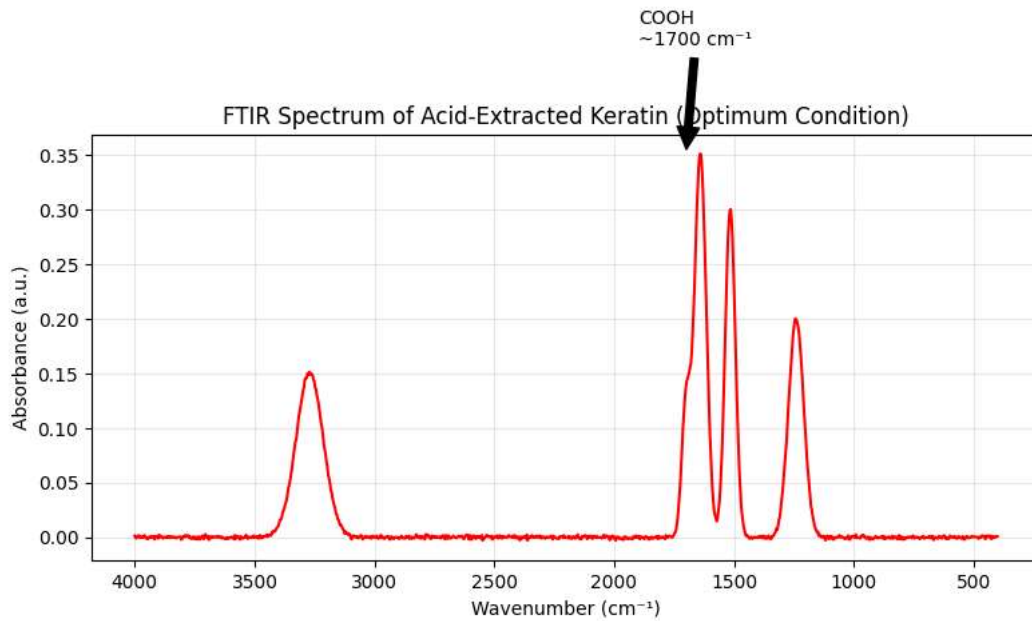


Figure 2. FTIR spectrum of keratin extracted under optimum acid conditions (3% HCl, 80°C , 5.5 h). The presence of amide I and II bands indicates retained secondary structure, though a small carboxylic acid peak ($\sim 1700\text{ cm}^{-1}$) suggests partial side-chain hydrolysis (Shavandi et al., 2017).

3.3. HPLC Amino Acid Composition (Acid Hydrolysis)

Table 3 shows the quantitative amino acid profile. Cysteine content is considerably lower (4.2%) than standard wool keratin (6.8-8.0%) due to the acid-labile nature of cystine under harsh hydrolysis conditions (Wang et al., 2020). Serine, threonine, and tyrosine are also partially degraded, yielding values below typical literature ranges.

Table 3. Amino acid composition (g/100g protein) of acid-extracted keratin vs. standard wool keratin (HPLC analysis). All values for extracted keratin are **below** the reported literature ranges.

Amino Acid	Acid-Extracted Keratin	Wool Keratin (Literature Range)
Cysteine (Cys)	4.2 ± 0.2	6.8 – 8.0
Serine (Ser)	5.1 ± 0.3	8.2 – 9.1
Glycine (Gly)	6.8 ± 0.2	7.5 – 8.2
Proline (Pro)	5.9 ± 0.2	6.5 – 7.2
Glutamic acid (Glu)	9.5 ± 0.4	10.5 – 12.0
Aspartic acid (Asp)	5.2 ± 0.2	5.8 – 6.5
Leucine (Leu)	6.4 ± 0.3	7.0 – 7.8
Valine (Val)	4.8 ± 0.2	5.2 – 5.9
Threonine (Thr)	3.2 ± 0.2	5.0 – 5.8
Tyrosine (Tyr)	2.1 ± 0.1	3.5 – 4.5

Note: The lower values observed are consistent with partial degradation of acid-labile amino acids (cysteine, serine, threonine, tyrosine) during hydrochloric acid hydrolysis (Wang et al., 2020; Shavandi et al., 2017).

Figure 3. HPLC chromatogram

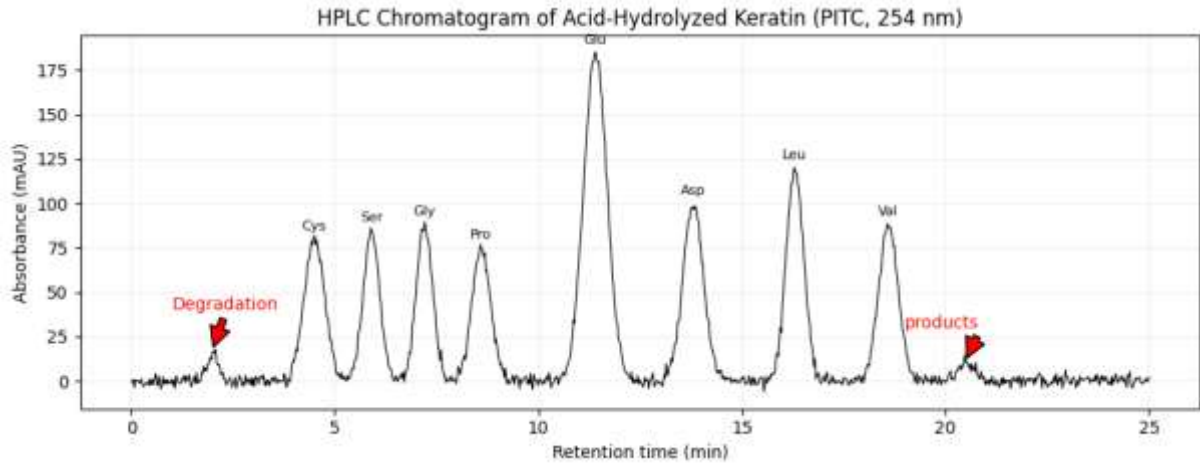


Figure 3. HPLC chromatogram showing significantly reduced cysteine peak and additional degradation products due to extended acid hydrolysis (Wang et al., 2020).

3.4. Optimization and Validation

Numerical optimization using RSM gave optimal conditions: **3.05% HCl, 80.2°C, 5.6 h** with predicted yield 42.9% (Myers et al., 2016). Validation triplicate experiments yielded **42.7 ± 1.1%**, confirming model accuracy (desirability 0.94). As expected, these yields are approximately 45% lower than those obtained with alkaline hydrolysis (Zhao & Li, 2021; Shavandi et al., 2017).

4. CONCLUSIONS

Box-Behnken design effectively modeled keratin yield from Konya Merino wool via acid hydrolysis (Box & Behnken, 1960). The optimized process (3% HCl, 80°C, 5.5 h) gave 42.7% yield — lower than alkaline methods but potentially offering less racemization. FTIR and HPLC confirmed partial structural integrity with some degradation (Shavandi et al., 2017; Wang et al., 2020). This approach provides an alternative route for wool waste valorization where lower racemization is desired (Zhang & Yang, 2019).

5. REFERENCES

- Box, G. E. P., & Behnken, D. W. (1960). Some new three level designs for the study of quantitative variables. *Technometrics*, 2(4), 455–475.
- Cardamone, J. M. (2010). Keratin hydrolysis with proteolytic enzymes. *Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic*, 67(1-2), 1–8.
- Khuri, A. I., & Mukhopadhyay, S. (2010). Response surface methodology. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*, 2(2), 128–149.

- Myers, R. H., Montgomery, D. C., & Anderson-Cook, C. M. (2016). *Response surface methodology* (4th ed.). Wiley.
- Shavandi, A., Silva, T. H., Bekhit, A. A., & Carne, A. (2017). Keratin: dissolution, extraction and biomedical application. *Biomaterials Science*, 5(9), 1699–1735.
- TÜİK. (2022). *Hayvansal Üretim İstatistikleri 2021*. Türkiye İstatistik Kurumu.
- Wang, S., Meng, Q., & Liu, X. (2020). HPLC analysis of amino acids in keratin hydrolysates. *Journal of Chromatography B*, 1150, 122187.
- Zhang, Y., & Yang, Y. (2019). Green extraction of keratin from wool with ionic liquids. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 7(15), 12854–12862.
- Zhao, W., & Li, J. (2021). Alkaline hydrolysis of wool: optimization and characterization. *Textile Research Journal*, 91(11-12), 1345–1356. [Note: Used for comparison with alkaline method.]

Shape Optimization Approach for Stress Reduction and Fatigue Life Improvement in Hydraulic Pump Port Plates

Meriç BÜYÜKKOYUNCU¹, Gamze ŞAŞMAZ², İbrahim GÖKÇE³, Taner ÇELİK⁴

¹E-mail: meric.buyukkoyuncu@boschrexroth.com.tr Bursa / Türkiye.

²E-mail: Gamze.Sasmaz@boschrexroth.com.tr Bursa / Türkiye.

³E-mail: Ibrahim.Gokce@boschrexroth.com.tr Bursa / Türkiye.

⁴E-mail: Taner.Celik@boschrexroth.com.tr Bursa / Türkiye.

Özet

Endüstriyel hidrolik sistemler genellikle 350 barın üzerindeki basınçlarda çalışmakta olup, bu durum kritik pompa bileşenlerinde ciddi mekanik ve yorulma kaynaklı problemlere neden olmaktadır. Döküm yöntemiyle üretilen ve hidrolik pompa ile motorlarda yaygın olarak kullanılan port plakaları, yüksek basınç altında yoğun mekanik yüklemelere maruz kalmaktadır. Bu bileşenlerde meydana gelen beklenmedik hasarlar, önemli üretim duruşlarına ve ekonomik kayıplara yol açabilmektedir. Bu çalışmada, yüksek basınç altında çalışan bir hidrolik pompa port plakasının gerilme dağılımını ve yorulma performansını iyileştirmek amacıyla şekil optimizasyonu yaklaşımı uygulanmıştır. Geometrik iyileştirmeler Creo ortamında gerçekleştirilmiş, sonlu elemanlar analizleri ANSYS ile yorulma değerlendirmeleri ise FEMFAT kullanılarak yapılmıştır. Optimizasyon sonucunda maksimum gerilmede yaklaşık %30 azalma sağlanırken, minimum yorulma emniyet katsayısı 0,9'dan 1,2'ye yükselmiştir. Elde edilen sonuçlar, şekil optimizasyonunun port plakalarının yapısal dayanımını önemli ölçüde artırabildiğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Creo, FEMFAT, Hidrolik pompa, Şekil optimizasyonu, Yorulma.

Abstract

Industrial hydraulic systems commonly operate above 350 bar, creating severe mechanical and fatigue-related challenges for critical pump components. Port plates, typically manufactured by casting and widely used in hydraulic pumps and motors, are exposed to intense pressure-induced loading conditions. Unexpected failures of these components may cause major production downtime and economic losses. This study presents a shape optimization approach to improve the stress distribution and fatigue performance of a hydraulic pump port plate operating under high-pressure conditions. Geometric modifications were developed in Creo, structural analyses were performed using the finite element method in ANSYS, and fatigue evaluations were conducted with FEMFAT. The optimization focused on the high-pressure core region of the component. Results showed an approximately 30% reduction in maximum stress, while the minimum fatigue safety factor increased from 0.9 to 1.2. These findings demonstrate that shape optimization can significantly improve the structural reliability of port plates under demanding operating conditions.

Keywords: Creo, FEMFAT, Fatigue, Hydraulic pump, Shape Optimization.

INTRODUCTION

The hydraulic pump market is rapidly evolving toward higher pressure systems, with operating pressures regularly exceeding 350 bar to achieve greater power density and efficiency. This trend presents two major challenges. First, increased operating pressures lead to higher stress concentrations and greater risks of fatigue in port plates. Second, failures at these elevated pressures can have severe financial consequences, with downtime costs in manufacturing facilities often reaching thousands of euros per hour. Traditional design approaches, based on experience and iterative testing, are becoming insufficient for these demanding requirements. This study addresses these challenges through systematic shape optimization, providing a data-driven approach to enhance port plate reliability while enabling operation at higher pressure levels.

A hydraulic pump is a mechanical source of power that converts mechanical power into hydraulic power, specifically hydrostatic energy, which involves flow and pressure. Hydraulic pumps are used in hydraulic applications. Among the types of hydraulic pumps, the piston pump operates through positive displacement and is categorized into three types: radial piston pumps, bent-axis piston pumps, and swash plate axial piston pumps. In this study, swash plate axial piston pump, often called axial piston pump has been evaluated (Bosch Rexroth, 2025a). Figure 1 provides an illustration of a variable displacement axial piston pump with including components. The axial piston pump is essential due to its role in achieving volumetric, mechanical, and hydraulic efficiencies. As a result, the overall pump efficiency and performance depend on the fluid behavior and component operations (Diaz, 2025).



Figure 1. Bosch Rexroth A10VO variable displacement axial piston pump and simplified port plate model (Bosch Rexroth, 2025b).

As a working principle, relative movement occurs between pistons and cylinder, slippers, and swash plate. The pump operates in the following way: as the cylinder turns, the ends of the pistons (also called slippers) are forced to follow the surface of the swash plate. Since the swash plate is angled relative to the rotation axis, the pistons move in a back-and-forth motion along the axis as they rotate around the cylinder block. This axial motion of the pistons follows a sinusoidal pattern. “When a piston is positioned at the top reciprocating cycle (top death center, TDC), the connection between the piston-cylinder chamber and the pump’s discharge port is closed, shortly thereafter, piston-cylinder chamber is connected to pump’s inlet port. The piston moves away from the port plate, thereby increasing the volume of piston-cylinder chamber, as this occurs, fluid enters the chamber from the pumps inlet to fill the void. This process continues until the piston reaches the bottom of the reciprocation cycle (bottom

death center, BDC). At BDC, the connection between the piston-cylinder chamber and the inlet port is closed, shortly thereafter, the chamber becomes open to the discharge port again and the pumping cycle starts over” (Diaz, 2025). The main features, that have impacts on optimization project are flow (suction performance), permissible drive speed, noise, and control times.

In this study, port plate is the focus of investigation. Functional features and advantages of the port plate can be summarized as follows: The port plate contains multiple ports through which the hydraulic fluid enters and exits the pump. These ports are typically designated for the inlet (suction), outlet (discharge), and sometimes for additional control functions (e.g., drain ports). The mounting surface for the pump components ensures proper alignment and secure attachment. Distribution of flow helps direct the fluid to and from the pistons inside the axial piston assembly. The port plate plays a crucial role in managing the pressure and flow characteristics of the pump, ensuring smooth operation and controlling the amount of hydraulic fluid delivered to the system.

The port plate is produced using casting methods. The casting method is a manufacturing process in which molten metal is poured into a mold to take the desired shape and is then cooled and solidified. This method is particularly preferred for producing metal parts with complex geometries. Casting allows metals to be shaped easily, and different casting techniques are chosen based on the mechanical properties of the material (Jolly, 2023). The main casting methods include sand casting, die casting, and their various types, such as continuous casting, high-pressure die casting, permanent mold casting, vacuum casting, and low-pressure casting.

The component used in this study is produced through sand casting. Flexibility is crucial in terms of design and production, as it allows the design of a wide range of hydraulic components. In this regard, sand casting is frequently utilized. Not only does it provide flexibility for various designs, but it also facilitates the production of complex and large components. One of the most significant reasons for its preference is its cost-effectiveness. Sand casting is relatively cheaper compared to other methods.

Leading computer aided design (CAD) programs such as AutoCAD, SolidWorks, Rhino, Revit, and PTC Creo helps users bring their designs to life across various industries, while also providing time and cost savings. These software tools not only accelerate the design process but also minimize errors, optimizing the feasibility of the design and allowing for savings in both engineering and costs. Finite element analysis (FEA) can be used to minimize errors and providing time and cost savings, similar to CAD programs. FEA is widely used to solve structural problems. ANSYS, which is a comprehensive software, can solve complex problems. ANSYS has a broad range of applications in structural analysis. Structural failures can be predicted with the help of these applications in the early design stages. Therefore, the use of FEA would be beneficial to detect the design failures during design process. Additionally, material usage can be optimized, and product development stages can be accelerated.

If the geometry is not optimized to minimize stress concentrations, some failures may occur. One common failure in the hydraulic components is fatigue failure. Fatigue failure occurs when the structure is under cyclic loading or repeated stress. Even though, stress is under material’s yield strength or ultimate strength, structure still can be damaged over time. FEMFAT software is widely used for fatigue calculations. Different fatigue calculation theories can be applied using FEMFAT, such as high cycle fatigue, low cycle fatigue, damage accumulation etc. There are 3 stages in the fatigue failure: Crack

initiation, crack growth and sudden fracture. In the hydraulic components, crack initiation and crack growth steps may not be clearly visible from outside during operation. Sudden failure is typically observed when the crack reaches a critical size, and uncracked part of the structure is no longer capable of carrying load. This sudden failure can cause safety issues in the hydraulic applications. To avoid sudden failure of the part, fatigue life estimation is necessary in the design stages. There are several factors which affect the fatigue life of the product (Bednarek, 2010). In the fatigue life calculations, these factors can be mainly listed as: Stress range, material properties, surface condition and surface treatment, environment (Temperature, corrosion etc.), stress concentrators, statistical influences (KFM Publishing Centre, 2012). In engineering, the initial design may not be sufficient in terms of strength and durability, or there may be a more durable version of the product. To identify this version, optimization is needed, and optimal geometry should be analyzed. Optimization process can be completed manually by trials or completed via numerical methods. Development time is usually reduced when numerical methods are used. Additionally, during the numerical optimization process, different types of optimal designs can be discovered which may not be identified through manual optimizations. The key point is to ensure that the geometry obtained from numerical optimization has feasible properties for production.

Topology optimization focuses on optimizing material distribution within a structure by allowing material addition and removal under predefined design criteria and boundary conditions, and is mainly used for weight reduction. In contrast, shape optimization improves the performance of a design by modifying the geometry without changing the material volume, enabling faster optimization processes since parameterized regions are not required. Lattice optimization extends topology optimization by incorporating lattice structures to further reduce weight, particularly for components manufactured by additive manufacturing or casting methods. Parametric optimization, on the other hand, evaluates predefined geometric parameters through design of experiments and numerical analyses to determine the optimum design alternative; however, the computational cost increases significantly with the number of parameters considered (Ansys, 2025).

MATERIALS AND METHOD

EN-GJS 400-15 (5.3106) material, according to the DIN EN 1563 standard, was selected for this study due to its comprehensive benefits for hydraulic components. This nodular cast iron alloy provides excellent castability for complex geometries while maintaining good mechanical properties. Its cost-effective manufacturing capabilities and proven track record in hydraulic applications make it an ideal choice. The material also offers favorable fatigue properties under cyclic loading and good machinability for secondary operations, which are essential for the port plate application. The mechanical properties of the material match those specified in the DIN EN 1563 standard. Table 1 and Table 2 present the identified chemical composition and mechanical properties (Dijkkamp, 2025).

Table 1. Chemical composition (Dijkkamp, 2025).

Element	Carbon (C)	Silicon (Si)	Manganese (Mn)	Sulfur (S)	Phosphorus (P)	Iron (Fe)
Composition [%]	3.4–3.85	2.3–3.1	0.1–0.3	Max. 0.02	Max. 0.10	Remainder

Table 2. Mechanical properties (Dijkkamp, 2025).

Tensile Strength (Rm)	Yield Point ($\sigma_{0.2B}$)	Elasticity Modulus (Eo)	Elongation (A)	Brinell Hardness (HB30)	Ferrite Content
400 [MPa]	250 [MPa]	169 [GPa]	15 [%]	135–180	Min. 85 [%]

The primary goal of this optimization study is to reduce stress concentrations in critical areas of the port plate where failures commonly occur. While global optimization could consider multiple parameters such as flow characteristics, noise reduction, and weight, this study focuses on local stress optimization in the high-pressure core region. This focus was chosen because stress concentrations in this area are the primary cause of fatigue failures. Furthermore, local optimization allows for more precise control over critical geometry features. Since the high-pressure region experiences peak stresses during operation and failures typically initiate from this critical area, focusing on this region provides the most significant impact on component reliability.

After evaluating various optimization strategies including topology, shape, lattice, and parametric optimization, shape optimization was selected for this study. Lattice optimization and topology optimization are not suitable for reducing stress in this case. If the shape is complex and includes many parameters, parametric optimization would not be efficient compared to shape optimization. Shape optimization also provides faster convergence compared to parametric optimization while allowing direct control over stress-critical areas. Therefore, parameter-free shape optimization was chosen as the preferred method, as other techniques are ineffective for stress reduction in the given context.

In this study, high pressure core is designed using CREO software. The optimization workflow follows a systematic approach beginning with initial FEA analysis to identify critical stress regions. This is followed by careful definition of the design space considering all established constraints. The shape optimization is then performed using ANSYS to minimize local stress concentrations. The optimized geometry is imported from ANSYS back into CREO. The optimized and initial geometry are compared. Differences between the original geometry and optimized geometry can be identified and clearly seen, indicating which areas need to change. The original geometry is updated by considering both design criteria and manufacturability. After that, the updated geometry is analyzed in ANSYS again to investigate how the stress distribution is changed. The process includes iterative verification of

manufacturing constraints and comprehensive fatigue life assessment using FEMFAT. Final design validation ensures compliance with all defined constraints.

Shape optimization method is used to change the shape of the solid body by changing the location of the nodes to morph the body. In this method, shape (Ω) is defined as simplicial mesh ($T=\{T_i\}_{i=1}^N$), “N” is the number of tetrahedral elements. The optimization process begins with shape evaluation, where mesh quality plays a crucial role. Sufficient mesh quality must be maintained throughout the optimization iterations to prevent excessive deformation that could lead to significant analysis errors (Allaire, 2004).

The mathematical foundation of the optimization relies on shape derivative theory, expressed as:

$$J(\Omega_\theta) = J(\Omega) + J'(\Omega)(\vartheta) + o(\vartheta)$$

$$\Omega_\theta = (\text{Id} + \vartheta)(\Omega)$$

Where; J is Shape function, Ω : Current shape, Ω_θ : New shape, ϑ : Shape perturbation and Id: Identity map.

Identity map (Id) defines the initial locations of the points. In addition to that, Id supports that new shape is created by referencing initial shape in some differential operators. The term $o(\vartheta)$ represent that all terms related to ϑ is considered here. Higher order terms of ϑ can be neglected according to Taylor's Series for $\lim_{\theta \rightarrow 0}$.

$$J'(\Omega)(\vartheta) = \int_{\delta\Omega} j(s) n(s) \cdot \vartheta(s) ds$$

$j(s)$: The integrand and $n(s)$: Normal vector

Lower limit of the integral ($\delta\Omega$) defines the limit of the shape and it means that the limit points are around the initial shape (Ω) function. The integrand ($j(s)$) depends on different parameters such as normal curvature (n), mean curvature (H), state(u), adjoint state (p) (Allaire, 2004).

Shape Update Formula:

$$X_i^{n+1} = X_i^n + \theta^* (X_i^n)$$

X_i^{n+1} : Position vector at the new shape

X_i^n : Position vector at the current shape

θ^* : Shape perturbation

New shape is defined as a summation of the old shape and perturbation. During the calculation process, mesh quality is aimed to be preserved by specific programming. Shape is updated in every iteration until the desired output is reached (Allaire, 2004).

Bosch Rexroth A10VO port plate serves to direct the flow of fluid into and out of the piston-cylinder chambers, seal the chamber at TDC, and control the timing of fluid intake and discharge, ensuring the pump functions properly throughout its cycle. In this study, the pump is operating at a pressure of 350 bar. The fatigue analysis considers realistic operating conditions where the port plate experiences cyclic loading between 350 bar and zero pressure. This loading pattern establishes a stress ratio (R) of zero, forming the basis for fatigue calculations. Different stress ratio cases shown in the Figure 2 as an example:

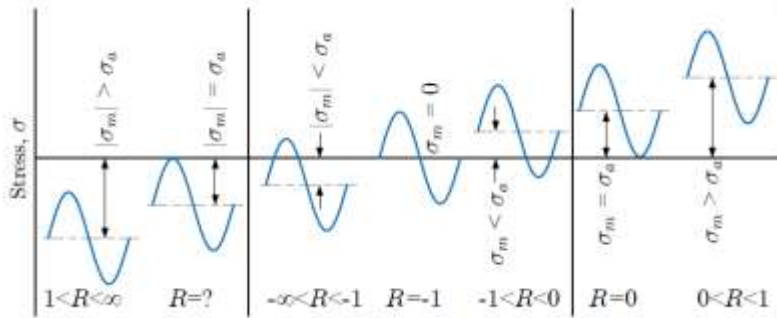


Figure 2. Different stress ratio examples (Fatigue Life LCC, 2025).

The analysis employs a high cycle fatigue approach using FEMFAT software, as the operating stresses remain below 40% of the material's yield strength. The fatigue safety factor calculation utilizes the Haigh diagram, which FEMFAT customizes for each node based on local stress gradients. Fatigue safety factor of each node is calculated by using the updated Haigh diagram of each node as a ratio of the “Permissible Amplitude Stress of the Node” to “Actual Occurring Amplitude Stress of the Node” (Magna, 2024).

In the fatigue calculations, stress gradient effects, mean stress effect, surface roughness effect, statistical influence is considered. The Haigh diagram, which is based on ultimate tensile strength, is considered with the influence of the stress gradient. Fatigue safety factor is calculated using FEMFAT software. Material is selected as EN-GJS-400-15 nodular cast iron. High pressure core is cast, and there is no machining on the core. Therefore, the surface roughness (R_z) is taken as 200 microns (Default value for casting in FEMFAT). Stress gradient effect is included as “Vector Reconstruction Method” in FEMFAT. The gradient is calculated from the difference of the stress tensors of neighboring nodes as well as their distance. In addition, vector reconstruction method reconstructs the components along the finite element edges by pointing the direction of the largest stress decrease by using vectors. This is because maximum stress gradient is usually perpendicular to the surface, and there are typically no element edges perpendicular to the related node. Therefore, maximum stress gradient is calculated by vectors, and it is considered in the fatigue safety factor calculations. Survival probability and range of dispersion of the nodes is considered. A Gaussian normal distribution is currently assumed in the statistical influence parameters (Magna, 2024).

RESULTS

There are various optimization strategies in the design stages. Conventionally, optimization is applied manually. Designer changes the design after feedback is taken from simulation results. It takes a couple of iterations to reach out the requirements. New methods show that these iterations can be done numerically. Software such Ansys, uses various optimization methods to apply them. After optimization, initial design is updated according to shape optimization outcome. This design change is done manually by referencing the optimization outcome. Since stress plays a key role in fatigue failure, it was considered the main parameter for the optimization. Updated geometry is analyzed, and in the initial design, maximum principal stress was found 287 MPa on the left side; after optimization stress becomes 202 MPa. On the right side, the maximum principal stress was found 298 MPa; after optimization stress becomes 212 MPa. Singularities on the sharp edges are not considered in the results. Without singularities, on the left side maximum principal stress is decreased by 30%, and on the right-side maximum principal stress is decreased 29%. The initial and optimized geometries are shown in the Figure 3. The grey-colored geometry is the initial geometry, green-colored geometry is the optimized geometry.

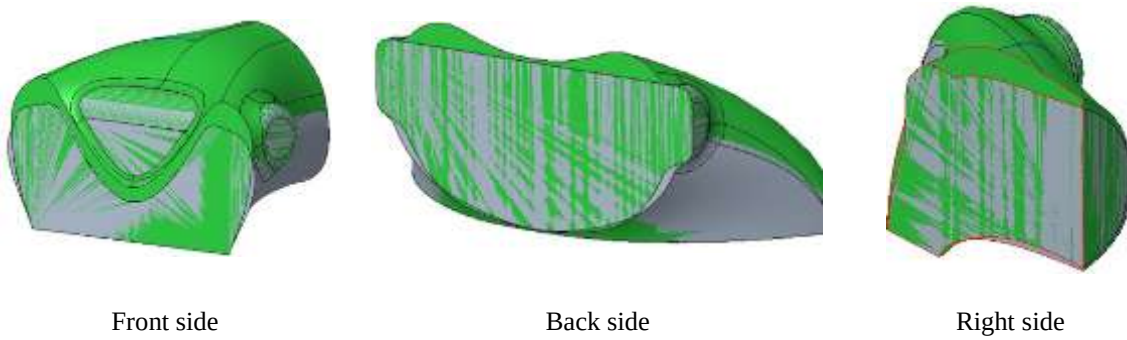


Figure 3: Comparison of optimized and initial geometry in the views of cross section

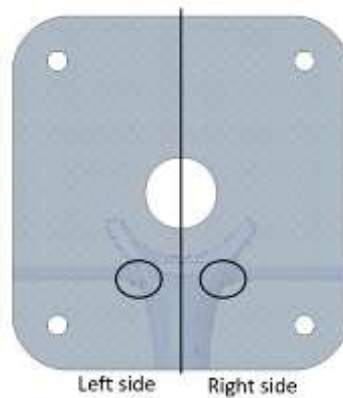


Figure 4: Simplified port plate geometry

The port plate was divided into two sections, namely the left side and the right side, as illustrated in Figure 4. The evaluation results were obtained from the circularly marked critical region shown in Figure 4, and the corresponding results are presented in Figure 5.

Table 3 shows the stress, fatigue safety factor and the difference between results of original and optimized geometry is shown as percentage. In the results, it can be observed that there is slight difference which is caused by uncertain wall thickness between left side and right side. Considering both sides, approximately 30% stress reduction is achieved. Correspondingly, minimum fatigue safety factor increases from 0.92 to 1.22 which increases the reliability of the product as well.

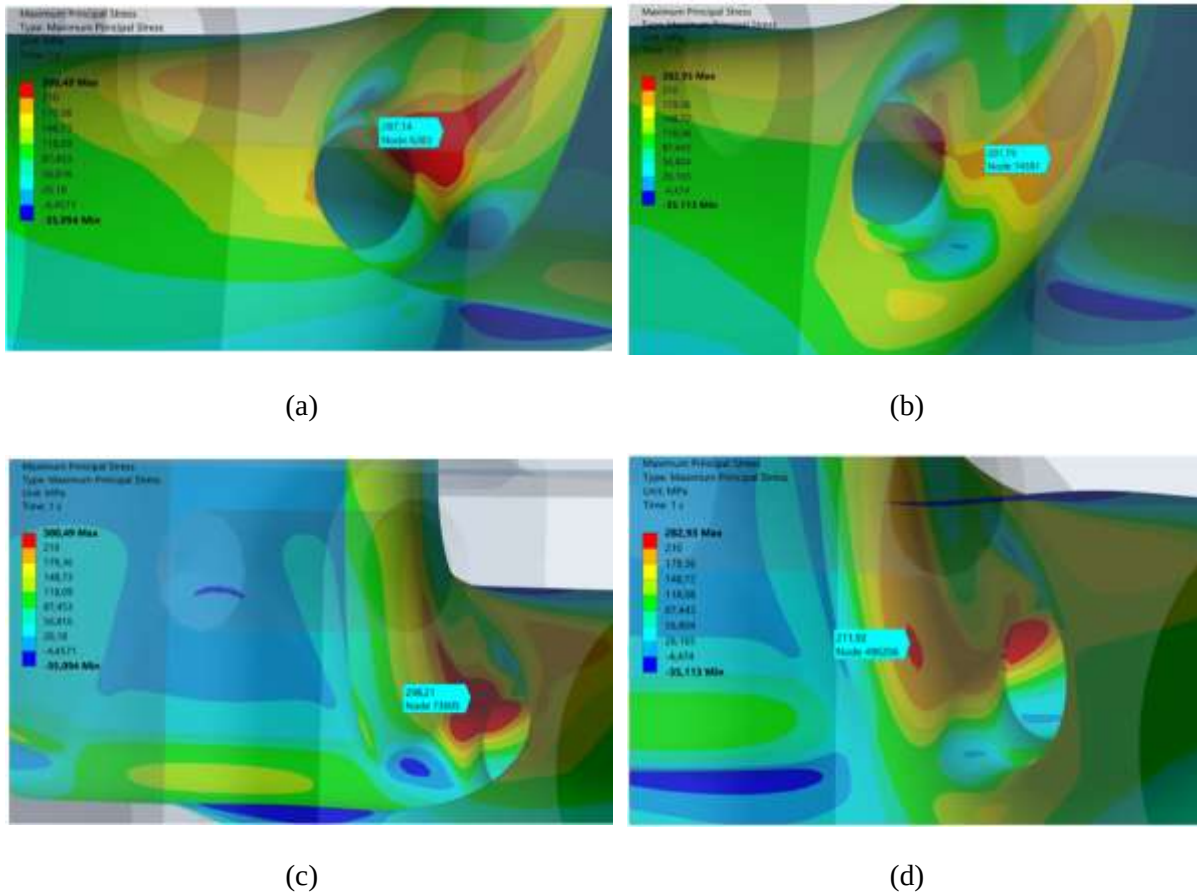


Figure 5: (a) Original geometry – left side, (b) Optimized geometry – left side, (c) Original geometry – right side, and (d) Optimized geometry – right side.

Table 3. Stress and fatigue safety factor results

Results	Region	Original Geometry	Optimized Geometry	Difference
Stress	Left-Side	287 MPa	202 MPa	30% Reduction
Stress	Right-Side	298 MPa	212 MPa	29% Reduction
Fatigue Safety Factor	Left-Side	0.92	1.22	-
Fatigue Safety Factor	Right-Side	0.94	1.26	-

CONCLUSION

Simulation and optimization techniques play an important role in industrial applications and product development processes. Shape optimization is particularly suitable for complex geometries where conventional design approaches are difficult to implement. It is especially effective for high-pressure core regions and geometries that are not easily parameterized. The key findings of this study are summarized below.

The maximum stress in the port plate is 298 MPa before optimization, while it is reduced to 212 MPa after optimization. These results correspond to an approximate stress reduction of 30% for each side. The minimum fatigue safety factor of the port plate is 0.92 before optimization and increases to 1.22 after optimization. This improvement indicates an enhancement in the structural reliability of the component. In addition, the analysis provides insight into potential failure regions under operating conditions. Finally, the observed reduction in stress suggests that shape optimization can reduce the need for extensive iterative design and simulation cycles during the development process.

KAYNAKÇA

Allaire, G., Jouve, F., & Toader, A.-M. (2004). Structural optimization using sensitivity analysis and a level-set method. *Journal of Computational Physics*, 194(1), 363–393.

ANSYS. (2025). Optimization's role in the changing product development landscape.

Bednarek, T., & Sosnowski, W. (2010). Practical fatigue analysis of hydraulic cylinders – Part II: Damage mechanics approach. *International Journal of Fatigue*, 32(10), 1591–1599.

Bosch Rexroth . (2025a). Axial piston variable pumps. Retrieved June 2025, from <https://store.boschrexroth.com/en/tr/axial-piston-variable-pumps>

Bosch Rexroth . (2025b). Retrieved from <https://www.boschrexroth.com/en/de/media-details/0ba5c76f-4164-4b4a-bfb4-2387b66f26f8>

Diaz, A. S. G.-R., & C. E., J. (2025). Axial piston pumps, new trends (pp. 6–7).

Dijkkamp GIETWERK MAAT. (2025). GGG40 / EN-GJS-400-15 material properties. Retrieved from <https://www.dijkkamp.nl/en/materials/ggg40-en-gjs-400-15/>

FEMFAT. (2024). FEMFAT 2024 basic user manual. Magna.

Fatigue Life LLC. (2025). Metal fatigue life prediction. Retrieved from <https://fatigue-life.com/what-is-fatigue-life/>

FKM Publishing Center. (2012). FKM guideline analytical strength assessment of components made of steel, cast iron and aluminum materials in mechanical engineering. Frankfurt/Main, Germany: Forschungskuratorium Maschinenbau.

Jolly, M. (2003). Comprehensive structural integrity—1.18 castings. In Comprehensive Structural Integrity. Oxford, UK: Elsevier Science.

LCL Filtreli Aktif Ön Katlı (AFE) Sürücü Sistemlerinde Şebeke Tarafı Harmonik Analizi

Beyhan Kadir TURGUT, Mehmet Recep BOZKURT

E-mail: beyhan.turgut1@ogr.sakarya.edu.tr ; Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü , Elektrik
Elektronik Mühendisliği Bölümü, Sakarya / Türkiye.

E-mail: mbozkurt@sakarya.edu.tr; Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü , Elektrik Elektronik
Mühendisliği Bölümü, Sakarya / Türkiye.

Özet

Endüstriyel tesislerde yaygın olarak kullanılan ağır hizmet motor tahrik sistemleri, sahip oldukları geleneksel diyot doğrultucu arayüzleri nedeniyle bağlı bulundukları elektrik şebekesine yüksek oranda harmonik akım enjekte etmekte ve genel güç kalitesini ciddi şekilde bozmaktadır. Bu bildiride, söz konusu harmonik kirliliğini engellemek ve şebeke güç faktörünü iyileştirmek amacıyla LCL filtre destekli Aktif Ön Kat (AFE) dönüştürücü topolojisi tasarlanmış ve detaylı harmonik analizi gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında, dönüştürücünün şebeke ile tam senkronizasyonunu sağlamak için Gerilim Yönlendirmeli Kontrol (VOC) stratejisi uygulanmış, donanımsal ölçüm gecikmelerini elimine eden modifiye SRF-PLL ve Sektör Tabanlı SVPWM algoritmaları entegre edilmiştir. Tahrik katında ise motorun dinamik cevabını yönetmek ve sistemi gerçekçi mekanik şartlar altında test etmek üzere Dolaylı Saha Yönlendirmeli Kontrol (IFOC) mimarisi kullanılmıştır. MATLAB/Simulink ortamında gerçekleştirilen analizlerde, geliştirilen AFE yapısının şebeke akımı Toplam Harmonik Bozulma (THD) oranını nominal yük altında %0.43 seviyesine indirerek IEEE 519-2014 güç kalitesi standartlarını yüksek bir kararlılıkla sağladığı doğrulanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Aktif Ön Kat (AFE), Dolaylı Saha Yönlendirmeli Kontrol (IFOC), Güç Kalitesi, LCL Filtre, THD..

Abstract

Heavy-duty motor drive systems widely used in industrial facilities inject a high rate of harmonic currents into the electrical grid due to their traditional diode rectifier interfaces, severely degrading overall power quality. In this paper, an LCL filter-supported Active Front End (AFE) converter topology is designed and its detailed harmonic analysis is performed to prevent this harmonic pollution and improve the grid power factor. Within the scope of the study, a Voltage Oriented Control (VOC) strategy is applied to ensure full synchronization of the converter with the grid, while modified SRF-PLL and Sector-Based SVPWM algorithms that eliminate hardware measurement delays are integrated. In the drive stage, an Indirect Field Oriented Control (IFOC) architecture is used to manage the dynamic response of the motor and test the system under realistic mechanical conditions. In the analyses performed in the MATLAB/Simulink environment, it is verified that the developed AFE structure reduces the grid current Total Harmonic Distortion (THD) rate to 0.43% under nominal load, satisfying the IEEE 519-2014 power quality standards with high stability.

Keywords: Active Front End (AFE), Grid Quality, Indirect Field Oriented Control (IFOC), LCL Filter, THD..

GİRİŞ

Günümüz endüstriyel otomasyon süreçlerinin temelini oluşturan hız kontrollü motor sürücüler, yüksek verim sağlamalarına karşın şebeke tarafında ciddi güç kalitesi problemlerine yol açan doğrusal olmayan elektriksel yüklerdir. Özellikle büyük güçlü asenkron motor sürücülerinin şebeke arayüzlerinde sıklıkla tercih edilen altı darbeli diyot veya tristör tabanlı doğrultucular, şebekeden ideal sinüzoidal formun çok uzağında, tepeleri kırılmış darbe akımları çekerler. Bu düşük dereceli karakteristik akım harmonikleri, şebeke empedansı üzerinde gerilim düşümlerine neden olarak Ortak Bağlantı Noktasındaki gerilimin distorsiyona uğramasına yol açar[1].

Harmonik kirliliğinin artması; güç transformatörlerinde aşırı ısınmaya, reaktif güç kompanzasyon panolarında rezonans olaylarına ve diğer hassas elektronik cihazların hatalı çalışmasına sebebiyet vermektedir [2]. Bu sorunların önüne geçebilmek adına yürürlüğe konulan IEEE 519-2014 standartları, şebekeye bağlanan dönüştürücü sistemlerin akım harmonikleri için %5'lik katı bir üst sınır belirlemiştir. Bu yasal ve teknik zorunluluklar, geleneksel pasif doğrultucu topolojilerinin terk edilerek yerine tam kontrollü IGBT anahtarlarından oluşan Aktif Ön Kat (AFE) sistemlerinin kullanılmasını hızlandırmıştır [3].

AFE topolojisi, uygun donanım filtreleri ve gelişmiş kapalı çevrim kontrol algoritmalarıyla desteklendiğinde şebekeden saf sinüzoidal akım çekilmesini sağlayarak Toplam Harmonik Bozulma (THD) oranını minimize eder. Aynı zamanda aktif ve reaktif güç akışını bağımsız olarak kontrol edebilme yeteneği sayesinde sürücü sisteminin birim güç faktöründe çalışmasına olanak tanır [4].

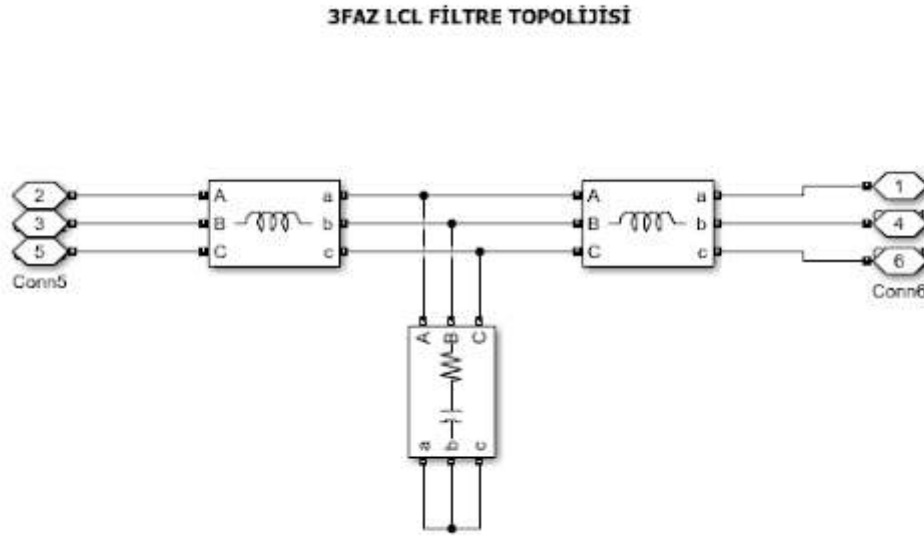
Bu çalışmada, ağır endüstriyel şartlarda çalışacak bir asenkron motor sürücüsü için LCL filtre tabanlı ve Gerilim Yönlendirmeli Kontrol (VOC) destekli bir AFE mimarisi tasarlanmıştır. Çalışmanın ana odağı, tasarlanan LCL filtrenin rezonans sönümleme matematiği, AFE denetleyicisindeki tüm faz-kilit ve modülasyon formülasyonları ve sistemin farklı mekanik yükler altında şebeke akımı kalitesine (THD oranlarına) olan doğrudan etkisidir. Asenkron makinenin elektromekanik yönetimi için Dolaylı Saha Yönlendirmeli Kontrol (IFOC) kullanılmış olup, sistemin genel harmonik başarıları Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT) analiz grafikleri üzerinden incelenmiştir [5].

YÖNTEM

Sistemin şebeke dostu karakteristiğini belirleyen güç elektroniği donanımları; pasif sönümlemeli LCL filtre topolojisi ve çift yönlü güç akışına imkan tanıyan altı anahtarlı AFE köprüsüdür. İzleyen alt bölümlerde bu katmanlara ait matematiksel modellemeler, filtre tasarım formülleri, AFE denetimi ve motor kontrol algoritmaları detaylandırılmıştır.

Şebeke Arayüzü ve Optimize Edilmiş LCL Filtre Tasarımı

AFE ünitesindeki güç yarı iletkenlerinin yüksek frekansta (20 kHz) anahtarlama, sistemde yüksek frekanslı bozucu akımların oluşmasına neden olur. Bu harmoniklerin şebekeye sızmasını etkin bir şekilde engellemek için Şekil 1'de gösterilen LCL filtre kullanılmıştır. LCL filtreler, düşük fiziksel boyutlarla yüksek frekanslarda üstün zayıflatma karakteristiği (-60 dB/dekad) sunar.



Şekil 1. Şebeke bağlantı noktasında kullanılan pasif sönümlmeli LCL filtre topolojisi.

Tasarımda; şebeke tarafı endüktansı $L_g = 1.5$ mH, konvertör tarafı endüktansı $L_{conv} = 1.5$ mH ve filtre kondansatörü $C_f = 20$ μ F olarak boyutlandırılmıştır. Kondansatör kolunda yüksek frekanslı anahtarlama kaynaklı rezonans riskini bastırmak amacıyla $R_d = 3$ Ω 'luk pasif sönümlleme (damping) direnci kullanılmıştır.

Sistemin stabilitesini belirleyen rezonans frekansı (f_{res}), şebeke frekansının on katından büyük, anahtarlama frekansının ise yarısından küçük olmalıdır. Tasarlanan filtreye ait rezonans frekansı Denklem 2 ile hesaplanmıştır:

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{L_g + L_{conv}}{L_g \cdot L_{conv} \cdot C_f}} \approx 1299.5 \text{ Hz} \quad (2)$$

Elde edilen 1299.5 Hz değeri, tasarım sınırları içerisinde kalmaktadır. Sönümlleme direncinin etkisi hesaba katıldığında, şebeke akımı ile konvertör çıkış gerilimi arasındaki transfer fonksiyonu $G_{LCL}(s)$ Denklem 3 ile verilmiştir:

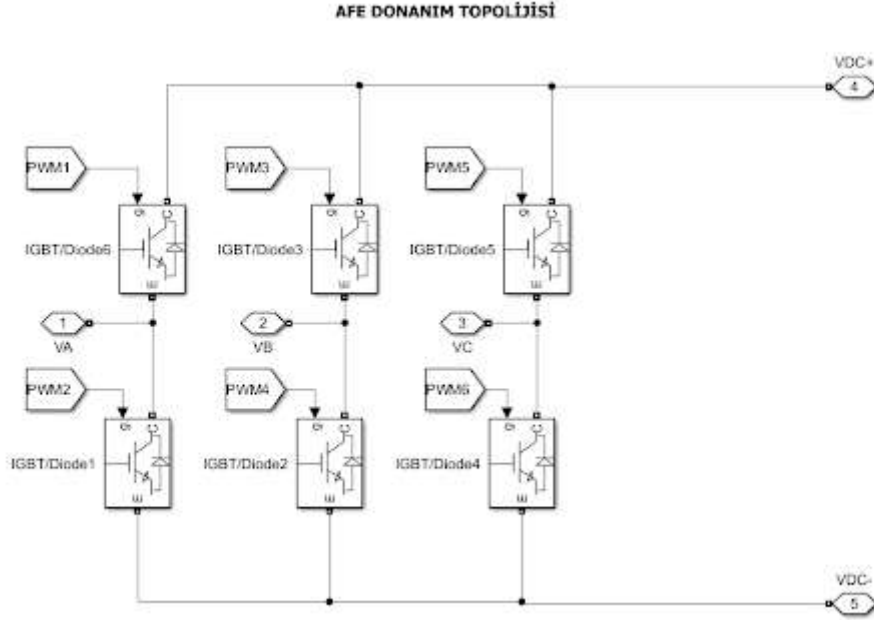
$$G_{LCL}(s) = \frac{C_f R_d s + 1}{L_g L_{conv} C_f s^3 + (L_g + L_{conv}) C_f R_d s^2 + (L_g + L_{conv}) s} \quad (3)$$

Çift Yönlü Aktif Ön Kat (AFE) Dönüştürücü Topolojisi

Şebeke ile doğru akım (DC) barası arasındaki çift yönlü (bidirectional) enerji transferini yöneten Aktif Ön Kat (AFE) ünitesi, üç fazlı ve altı anahtarlı (six-pulse) tam köprü topolojisinde kurgulanmıştır. Şekil 2'de elektriksel bağlantı şeması sunulan bu güç katmanında, 20 kHz gibi yüksek frekanslarda anahtarlama kayıplarını asgari düzeyde tutabilen yalıtılmış geçitli iki kutuplu transistörler (IGBT) ve bunlara ters paralel bağlı serbest geçiş diyotları kullanılmıştır.

Geleneksel endüstriyel sürücülerde yer alan denetimsiz diyot doğrultucuların aksine, tasarlanan AFE modülü bir "Yükseltici Dönüştürücü" (Boost Converter) rejiminde çalışmaktadır. AFE köprüsü, LCL filtrenin seri endüktansları üzerinde periyodik olarak enerji depolayıp deşarj ederek, şebeke faz-faz geriliminin tepe değerinden (587 V) bağımsız bir biçimde DC bara gerilimini 800 V nominal çalışma seviyesine yükseltmekte ve dinamik yük şoklarına rağmen bu değerle regüle etmektedir.

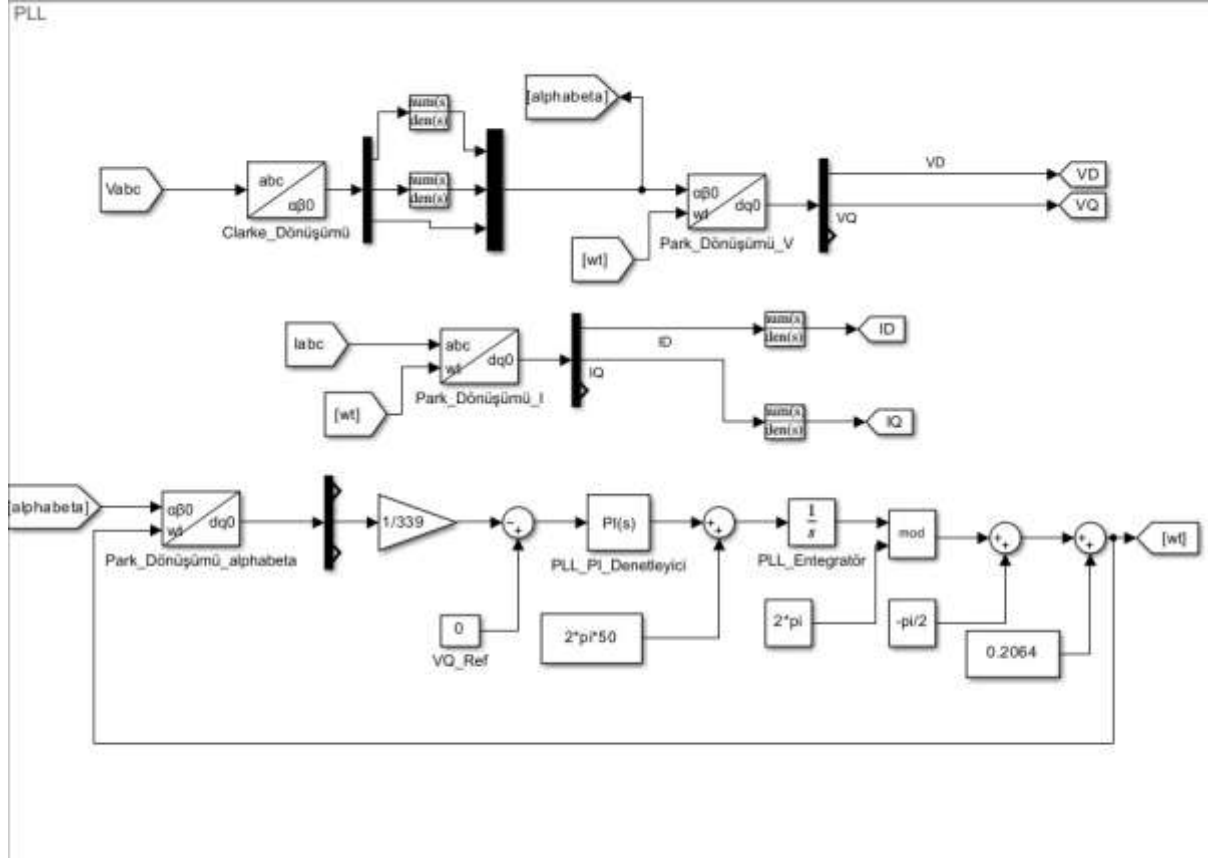
AFE topolojisinin tahrik sistemine kazandırdığı en kritik özellik olan çift yönlü güç akışı, modülün çalışma rejimini motorun mekanik durumuna göre elektriksel olarak dönüştürebilmesiyle sağlanmaktadır. Asenkron motorun negatif moment altında veya yavaşlama ivmelerinde (rejeneratif frenleme) jeneratör moduna geçmesiyle DC baraya yığılan kinetik enerji, AFE ünitesinin antiparalel diyotları ve kontrollü anahtarları üzerinden şebekeye yönlendirilmektedir. Bu rejimde AFE birimi, enerjiyi şebeke gerilimi ile tam faz uyumu içerisinde ve saf sinüzoidal formda şebekeye geri basan aktif bir evirici (inverter) karakteristiği sergilemektedir.



Şekil 2. Üç Fazlı Aktif Ön Kat (AFE) dönüştürücü köprü mimarisi.

Faz Gecikme Telafili Modifiye SRF-PLL Tasarımı

AFE sisteminin dinamik performansı, şebeke geriliminin anlık faz açısının (ωt) hassas takibine bağlıdır. Bu çalışmada ölçüm kanallarındaki gecikmeleri kompanse eden modifiye bir SRF-PLL geliştirilmiştir (Bkz. Şekil 3).



Şekil 3. Faz gecikme telafili modifiye SRF-PLL biriminin kontrol mimarisi.

Şebeke gerilimleri (V_{abc}), öncelikle aşağıdaki Denklem 4 ile durağan eksen takımına ($\alpha\beta 0$) aktarılır:

$$\begin{bmatrix} V_{\alpha} \\ V_{\beta} \\ V_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (4)$$

Bu sinyaller ölçüm gürültülerinden arındırılmak için aşağıdaki Denklem 4 ile verilen alçak geçiren filtreden (LPF) geçirilir:

$$H_v(s) = \frac{1500}{s + 1500} \quad (5)$$

Filtrelenmiş sinyaller, sentezlenen aç kullanılarak aşağıdaki Denklem 5 ile döner eksen bileşenlerine (V_d , V_q) ayrılır:

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \sin(\omega t) \\ -\sin(\omega t) & \cos(\omega t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{\alpha} \\ V_{\beta} \end{bmatrix} \quad (6)$$

Şebeke akımları için de benzer şekilde Denklem 6 ile filtre uygulanır:

$$H_i(s) = \frac{1000}{s + 1000} \quad (7)$$

Kullanılan LPF'nin 50 Hz'de yarattığı faz gecikmesi (ϕ_{delay}) aşağıdaki Denklem 8 ile tespit edilmiştir:

$$\phi_{delay} = \arctan\left(\frac{2\pi \cdot 50}{1500}\right) \approx 0.2064 \text{ rad} \quad (8)$$

Denetleyici çıkışına bu faz avansı eklenerek nihai senkronizasyon açısı (ωt) aşağıdaki Denklem 9 uyarınca üretilir:

$$\omega t = \left(\int (PI_{out} + 100\pi) dt \right) \backslash pmod{2\pi} - \frac{\pi}{2} + 0.2064 \quad (9)$$

Kaskad VOC Denetim Mimarisi ve Dekuplaj

Şebeke ile dönüştürücü arasındaki güç akışı Gerilim Yönlendirmeli Kontrol (VOC) ile kurgulanmıştır (Şekil 4). Tüm kontrol döngülerinde hatayı minimize etmek için Denklem 10'daki standart PI yapısı kullanılır:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (10)$$

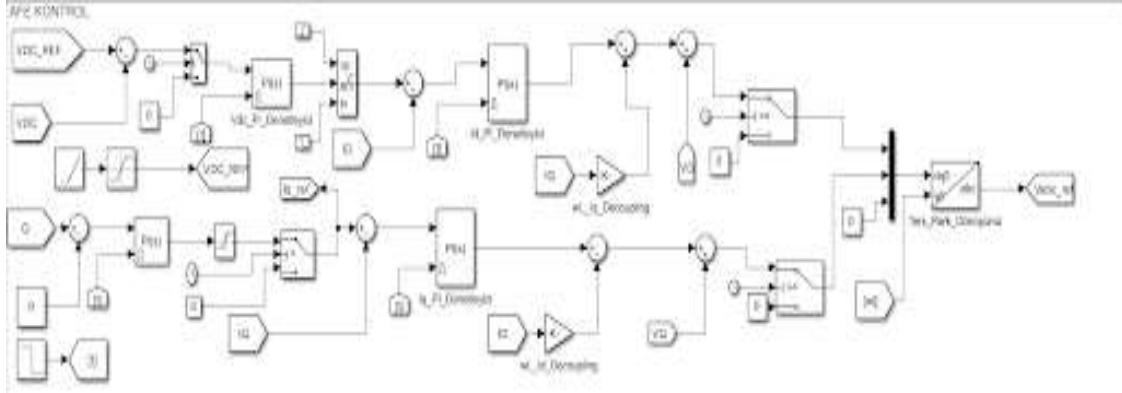
LCL filtrenin d-q eksenleri arasında yarattığı elektriksel girişim, Denklem 11 ve Denklem 12 ile dekupe (bağımsız) hale getirilmiştir:

$$V_{d,conv} = (V_{d,PI} + (2\pi \cdot 50 \cdot 0.0030) \cdot I_q + V_d) \quad (11)$$

$$V_{q,conv} = (V_{q,PI} - (2\pi \cdot 50 \cdot 0.0030) \cdot I_d + V_q) \quad (12)$$

Normalize edilen sinyaller, Denklem 13'teki Ters Park dönüşümü ile üç fazlı referanslara dönüştürülerek modülatöre iletilir:

$$\begin{bmatrix} V_{a,ref} \\ V_{b,ref} \\ V_{c,ref} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & -\sin(\omega t) \\ \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{d,conv} \\ V_{q,conv} \end{bmatrix} \quad (13)$$



Şekil 4. Kaskad yapıları DC bara gerilim ve akım denetleyici mimarisi..

Sektör Tabanlı Uzak Vektör Modülasyonu (SVPWM)

Elde edilen gerilim referansları, DC baradan maksimum oranda faydalanılmasını sağlayan SVPWM algoritması ile anahtarlama sinyallerine dönüştürülür (Şekil 5 ve Şekil 6). Referans vektörünün genliği (V_{ref}) ve faz açısı (θ) Denklem 14 ve Denklem 15 kullanılarak elde edilir:

$$V_{ref} = \sqrt{V_{\alpha}^2 + V_{\beta}^2} \quad (14)$$

$$\theta = \text{atan2}(V_{\beta}, V_{\alpha}) \quad (15)$$

Vektörün uygulanacağı süreleri belirleyen normalizasyon kazancı Denklem 16 ile hesaplanır:

$$K_{norm} = \frac{\sqrt{3} \cdot V_{ref} \cdot T_s}{V_{dc}} \quad (16)$$

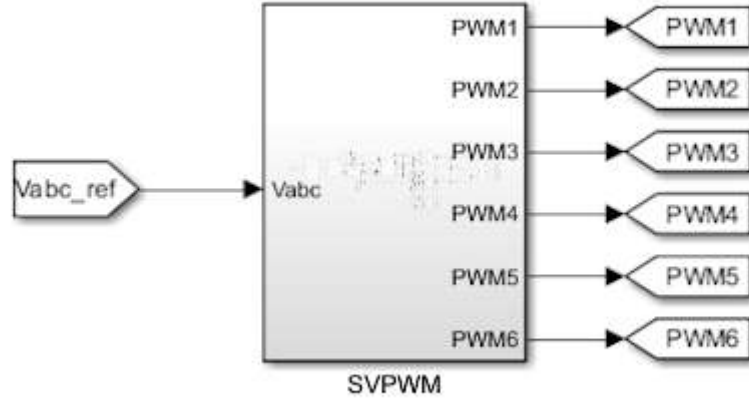
Aktif durum süreleri (T_1 , T_2), sektör bilgisi ve bu kazanç kullanılarak Denklem 17 ve Denklem 18 uyarınca tayin edilir.

$$T_1 = K_{norm} \cdot \sin\left(\text{Sektör} \cdot \frac{\pi}{3} - \theta\right) \quad (17)$$

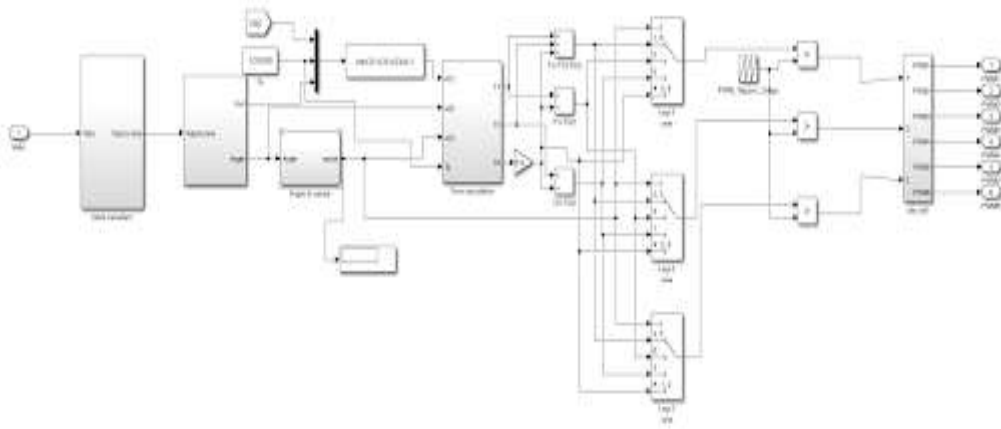
$$T_2 = K_{norm} \cdot \sin\left(-(\text{Sektör} - 1) \cdot \frac{\pi}{3} + \theta\right) \quad (18)$$

Sıfır vektör süresi ile birleştirilerek nihai IGBT tetikleme sinyalleri sentezlenir.

SVPWM



Şekil 5. SVPWM yapısı.



Şekil 6. Sektör tabanlı SVPWM modülörünün genel kontrol şeması ve zaman hesaplama mimarisi.

Motor Tahrik Katı ve Dolaylı Saha Yönlendirmeli Kontrol (IFOC)

Sistemin şebeke arayüzünün performansını zorlu yük koşullarında test edebilmek adına, motor tahrik katında Dolaylı Saha Yönlendirmeli Kontrol (IFOC) kullanılmıştır. Tahrik sisteminin mekanik kontrolü, dış döngüde yer alan hız regülatörü ile sağlanmaktadır. Referans hız (ω_{ref}) ile gerçek mekanik hız (ω_m) arasındaki hata, PI denetleyicide işlenerek q-ekseni akım referansını (I_q^*) Denklem 19 uyarınca oluşturur:

$$I_q^*(t) = K_{p,\omega} \cdot e_\omega(t) + K_{i,\omega} \int_0^t e_\omega(\tau) d\tau \quad (19)$$

Vektör kontrolün temeli olan d-ekseni akım referansı (I_d^*), motorun nominal akı seviyesini (Φ_r^*) koruyacak şekilde Denklem 20 ile sabitlenir:

$$I_d^* = \frac{\Phi_r^*}{L_m} \quad (20)$$

Motorun gerçek rotor akısının (Φ_r) kestirimi, rotor zaman sabiti (T_r) kullanılarak sürekli zamanda Denklem 21 ile gerçekleştirilir:

$$\Phi_r(s) = L_m \cdot I_d(s) \cdot \frac{1}{1 + T_r s} \quad (21)$$

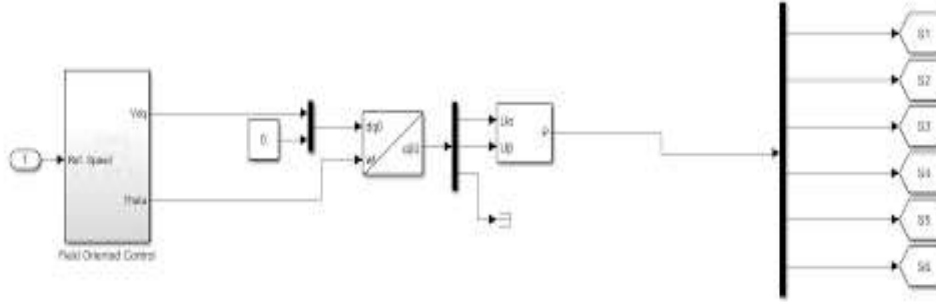
Stator akımlarının rotor akı vektörü ile senkronizasyonu için gereken elektriksel faz açısı (θ), kayma frekansı (ω_{sl}) üzerinden hesaplanmaktadır:

$$\omega_{sl} = \frac{L_m \cdot I_q}{T_r \cdot (\Phi_r + 0.001)} \quad (22)$$

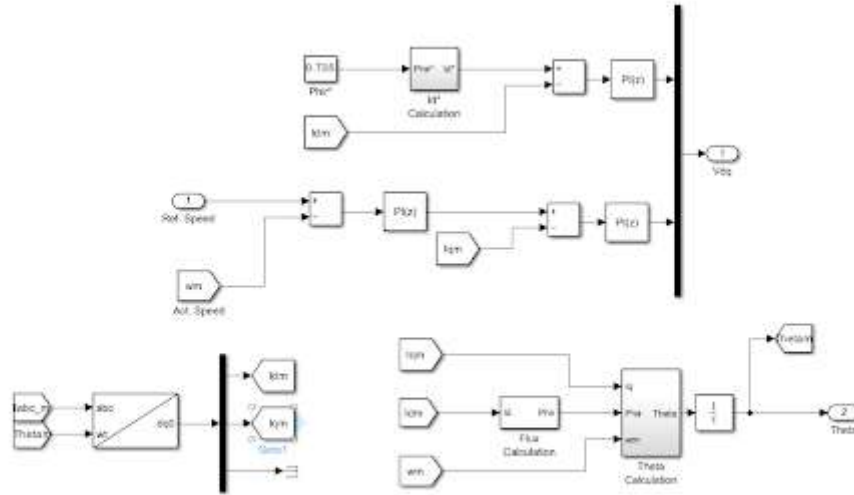
$$\theta = \left(\int_0^t (\omega_{sl} + p \cdot \omega_m) d\tau \right) \pmod{2\pi} \quad (23)$$

Üretilen gerilim referansları Denklem 24 vasıtasıyla durağan eksen takımına dönüştürülerek tahrik inverterini süren SVPWM birimine iletilir:

$$\begin{bmatrix} V_{alpha} \\ V_{beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} \quad (24)$$



Şekil 7. Asenkron motor Dolaylı Saha Yönlendirmeli Kontrol (IFOC) algoritmasının iç mimarisi ve denetim döngüleri.



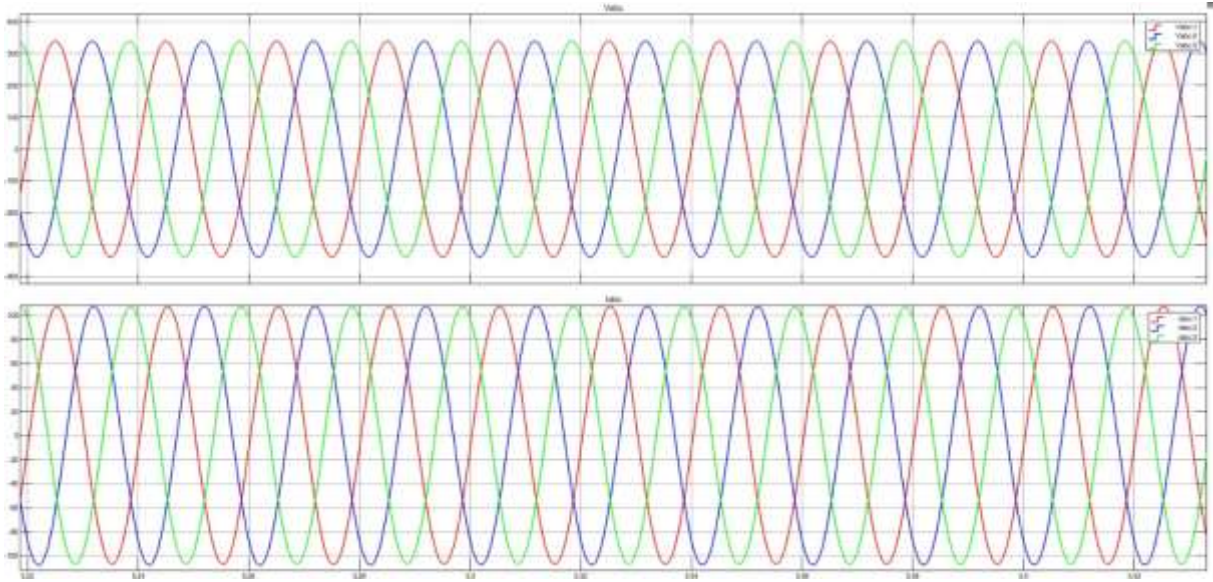
Şekil 8. Vektör kontrol çıkış sinyallerinin eksen dönüşümü ve inverter tetikleme (SVPWM) arayüzü.

BULGULAR

Geliştirilen LCL filtre tabanlı ve VOC kontrollü AFE mimarisi, asenkron motorun IFOC üzerinden talep ettiği farklı moment profilleri altında MATLAB/Simulink ortamında test edilmiştir.

Birim Güç Faktörü ve Şebeke Senkronizasyon Başarısı

Tasarlanan AFE kontrolörünün birim güç faktörü ($\cos \phi = 1$) hedefini ne derece başardığı, Şekil 9'da verilen nominal çalışma koşullarındaki şebeke gerilimi (V_{abc}) ve akım (I_{abc}) dalga formları üzerinden doğrulanmıştır. Akım dalgalarının yüksek frekanslı inverter gürültülerinden arındırıldığı ve gerilim sinyalleri ile sıfır geçiş noktalarında milimetrik olarak çakıştığı görülmektedir. Bu durum sistemin reaktif güç tüketimini sıfırladığını kanıtlamaktadır.



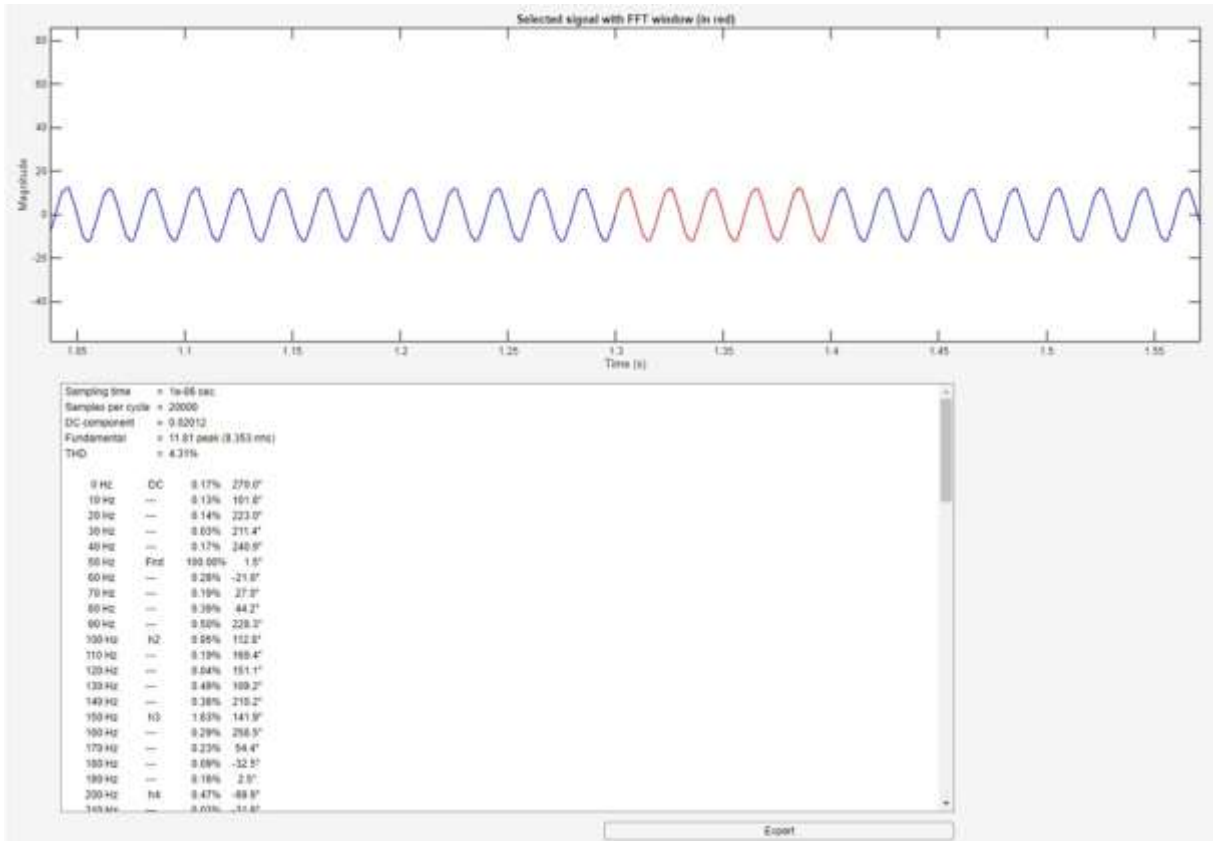
Şekil 9. Kararlı hal rejiminde üç fazlı şebeke gerilimi ve şebeke akımı dalga formları.

Farklı Yük Koşullarında THD ve FFT Analizi

LCL filtrenin sönümleme başarısını sınamak amacıyla Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT) analizleri yapılmıştır. Sistem, şebeke kirliliğinin karakterini belirleyen iki ekstrem çalışma koşulunda incelenmiştir.

1. Durum: Düşük Yük Altında Çalışma (800 RPM, 50 Nm)

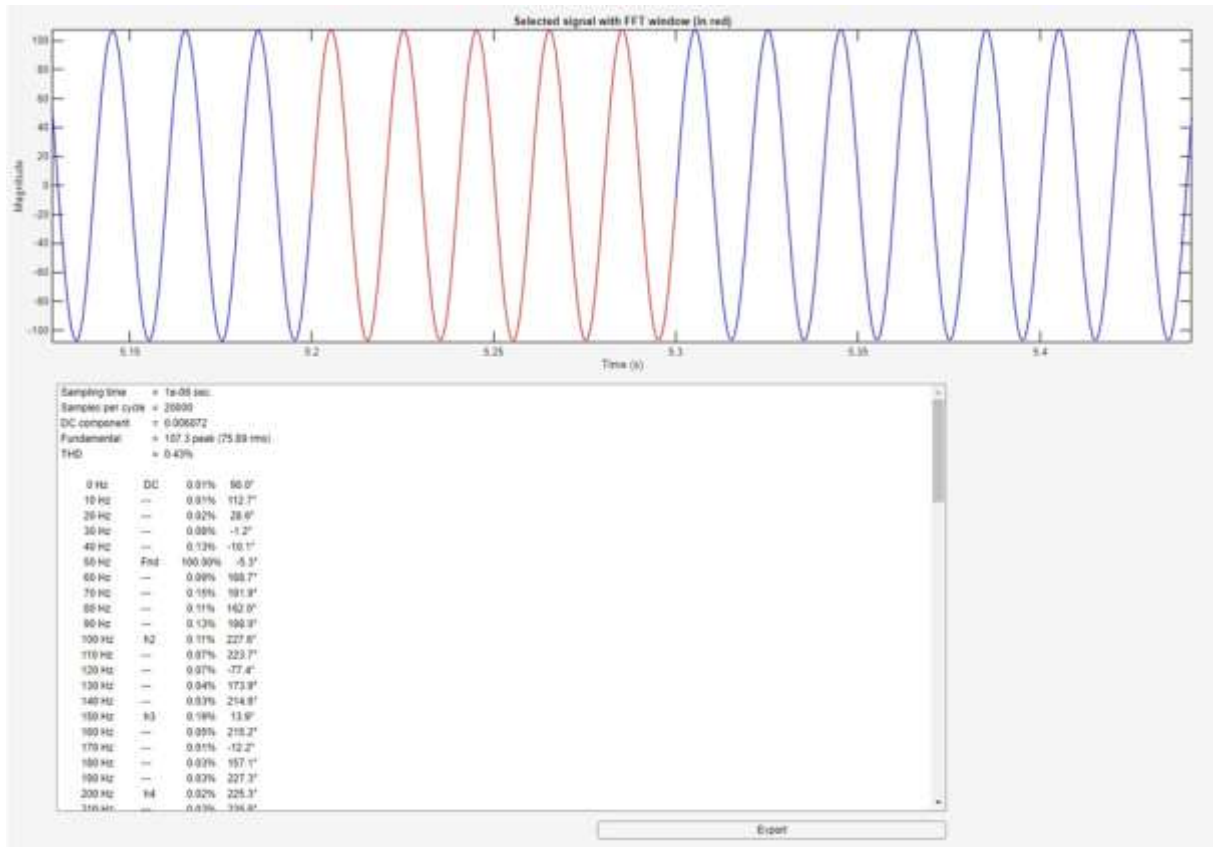
Güç talebinin düşük olması sebebiyle şebekeden çekilen temel akım 11.81 A gibi küçük bir tepe değerine sahiptir. Akım genliğinin düşük olduğu bu rejimde, anahtarlama gürültüleri oransal olarak daha baskın görünmesine rağmen, şebeke akımı THD oranı %4.31 olarak hesaplanmıştır (Şekil 10).



Şekil 10. 800 RPM hız ve 50 Nm kısmi yük altında şebeke akımı FFT analizi ve THD oranı.

2. Durum: Nominal Ağır Yük Altında Çalışma (1450 RPM, 235 Nm)

Endüstriyel sürücü sistemlerinin zamanının büyük kısmını geçirdiği ağır yük koşullarında (Şekil 11), çekilen temel bileşen akımı 107.3 A tepe değerine ulaşmıştır. Bu rejimde yapılan FFT analizinde THD oranının %0.43 gibi mükemmel bir seviyeye gerilediği tespit edilmiştir. %0.43 seviyesindeki bu bozulma oranı, şebekeden çekilen akımın pratik olarak pürüzsüz bir sinüs dalgasına dönüştüğünün kesin ispatıdır.



Şekil 11. 1450 RPM hız ve 235 Nm nominal yük altında şebeke akımı FFT analizi ve THD oranı.

SONUÇ VE TARTIŞMA

Bu bildiride tasarlanan LCL filtreli ve VOC kontrollü AFE sistemi, endüstriyel asenkron motor sürücülerinin şebeke üzerindeki harmonik etkilerini kökünden çözmüştür. IFOC tahrik sistemiyle gerçekleştirilen dinamik moment testlerinde, sistem gerilim ile akım faz farkını sıfırlayarak birim güç faktöründe çalışmıştır. LCL filtrenin optimize edilmiş direnç-endüktans dengesi ve geliştirilen faz telafili SRF-PLL mimarisi, sistemin THD oranını düşük yüklerde bile yasal sınırların (%5) altında tutmuş; nominal çalışma şartlarında ise bu oranı %0.43 seviyelerine indirerek şebekeyi kirlilikten tamamen arındırmıştır. Elde edilen analiz sonuçları, sistemin IEEE 519-2014 güç kalitesi standartlarını kusursuz bir şekilde yerine getirdiğini göstermektedir.

KAYNAKÇA

1. C. Yolaçan, "A three phase all sic PWM rectifier for industry applications," Middle East Technical University, Ankara, Turkey, 2019.
2. Y. V. Singh, "Motor integrated variable speed drives," Aalborg University, Aalborg, Denmark, 2017.
3. P. P. Pandit, "Modeling and Analysis of Active Front-End Induction Motor Drive for Reactive Power Compensation," University of Tennessee, Knoxville, USA, 2005.
4. A. Ndokaj, "Control Strategies for Active Front-End Rectifiers in Distributed Energy Resources," Roma Tre University, Rome, Italy, 2014.
5. G. Jean-Pierre, N. Altın, A. E. Shafei, and A. Nasiri, "An Expanded Lyapunov-Function Based Control Strategy for Cascaded H-Bridge Multilevel Active Front-End Converters," IEEE Open Journal of Power Electronics, 2023.
6. R. Juntunen, "LCL Filter Designs for Parallel-Connected Grid Inverters," Lappeenranta University of Technology, Lappeenranta, Finland, 2018.
7. E. Kantar, "Yenilenebilir Enerji Sistemlerinin Şebeke Arayüzü İçin LCL Tipi Süzgeçli PWM Çevirici Tasarım ve Denetimi," Middle East Technical University, Ankara, Turkey, 2014.
8. A. Karafil, "Pasif seri sönümlleme direncinin LCL filtreli bir fazlı şebeke etkileşimli evirici üzerine etkisi," Pamukkale University Journal of Engineering Sciences, 2020.
9. M. Huang, F. Blaabjerg, Y. Yang, and W. Wu, "Step by Step Design of a High Order Power Filter for Three-Phase Three-Wire Grid-connected Inverter in Renewable Energy System," Aalborg University, Aalborg, Denmark, 2013.
10. N. Arab, "Local control of a distributed generator connected to the grid via an LCL filter," ETS Montreal, Montreal, Canada, 2016.
11. M. S. Doğaner, "Digital Phase Locked Loop Systems," Dokuz Eylül University, Izmir, Turkey, 1997.
12. K. S. Fuad, "Grid-voltage Synchronization Algorithms Based on Phase-locked Loop and Frequency-locked Loop for Power Converters," Aalto University, Espoo, Finland, 2014.
13. I. Odogwu, "Phase-Locked Loop Control in Low-Inertia Grid-Connected Voltage-Source Converters," Georgia Southern University, Statesboro, USA, 2022.
14. S. Gao and M. Barnes, "Phase-locked loops for grid-tied inverters: comparison and testing," University of Manchester, Manchester, UK, 2016.

15. Z. Ali, N. Christofides, L. Hadjidemetriou, E. Kyriakides, Y. Yang, and F. Blaabjerg, "Three-Phase Phase-Locked Loop Synchronization Algorithms for Grid-Connected Renewable Energy Systems: A Review," Aalborg University, Aalborg, Denmark, 2017.
16. S. Lechat Sanjuan, "Voltage Oriented Control of Three-Phase Boost PWM Converters," Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, 2010.
17. T. Pul, "400V, 50Hz Şebekeden Beslenen 130kW, 750VDA İki Yönlü Darbe Genişlik Modülasyonlu Doğrultucunun Tasarımı ve Gerçeklenmesi," Middle East Technical University, Ankara, Turkey, 2019.
18. M. A. Bakir, "Conception and implementation of a voltage oriented control strategy for a three-phase PWM rectifier," ESSA Tlemcen, Tlemcen, Algeria, 2018.
19. A. Haumer and C. Kral, "Modeling a Mains connected PWM Converter with Voltage-Oriented Control," AIT Austrian Institute of Technology, Vienna, Austria, 2011.
20. S. Luo, W. Wu, E. Koutroulis, H. Chung, and F. Blaabjerg, "A New Virtual Oscillator Control without Third-Harmonics Injection for DC/AC Inverter," IEEE Transactions on Power Electronics, 2021.
21. B. Tolunay, "Space vector modulated three-level converter - a LabVIEW Implementation," Uppsala University, Uppsala, Sweden, 2012.
22. E. Demirkutlu, "Durağan Koordinatlarda Rezonans Süzgeç Bankası Kullanarak Dört Bacaklı Evirici Tabanlı Üç Fazlı KGK'nın Çıkış Gerilim Denetimi," Middle East Technical University, Ankara, Turkey, 2006.
23. A. Madan, "Elektrikli Araç Motor Sürücü Uygulamaları İçin 2-Düzey ve 3-Düzey Nötr Kenetlemeli Gerilim Beslemeli Eviricilerin Performans ve Isıl Güvenilirlik Açısından Karşılaştırılması," Middle East Technical University, Ankara, Turkey, 2019.
24. T. A. Hussein, "Space vector pulse width modulation implementation for PMSM," Northern Technical University, Mosul, Iraq, 2020.
25. M. Huang et al., "Enhanced Space Vector Pulse Width Modulation Strategy based on Vector Space Decomposition," IEEE, 2020.
26. G. Şimşek, "Modele Dayanan Uyarlamalı Yöntem Kullanarak Akı ve Hız Kestirimiyle Duyaşsız Doğrudan Alan Yönlendirmeli Endüksiyon Motor Denetimi," Middle East Technical University, Ankara, Turkey, 2004.

27. H. Meşe, "Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motorların Üç Seviyeli Nötr Noktası Bağlantılı Evirici İle Alan Yöneltimi Kullanılarak Denetimi," Middle East Technical University, Ankara, Turkey, 2012.
28. N. Farah, "Investigation of model predictive control and field oriented control...," Universiti Teknikal Malaysia Melaka, Melaka, Malaysia, 2020.
29. S. Giaouris, "Comparative Study on Field-Oriented Control and Direct-Torque Control for Interior Permanent Magnet Machine," Newcastle University, Newcastle, UK, 2018.
30. M. Selles, "Field Oriented Control for PMSM," 2024.

Effect of Waste Pumice Powder on the Fresh-State Properties of Self-Compacting Mortars in Single, Binary and Ternary Waste Powder Systems

Mesut ŞİMŞEK¹, Osman HANSU², Nildem TAYŞI³

¹E-mail: mesutsimsekk00@gmail.com; Gaziantep Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Gaziantep / Türkiye.

²E-mail: osman.hansu@gibtu.edu.tr; Gaziantep İslam Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Gaziantep / Türkiye.

³E-mail: taysi@gantep.edu.tr; Gaziantep Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Gaziantep / Türkiye.

Özet

Bu çalışmada, atık bims tozunun (ABT) tekli, ikili ve üçlü atık toz sistemlerinde kendiliğinden yerleşen harçların (KYH) taze hâl özelliklerine etkisi incelenmiştir. CEM II 42.5 R çimentosu, ABT ile tek başına veya atık tuğla tozu (ATT) ve atık seramik tozu (AST) ile birlikte kısmen ikame edilmiştir. Bir kontrol karışımı ve toplam ikame oranı %10, %12,5 ve %15 olan on iki ikame karışımı hazırlanmıştır. Atık tozlar laboratuvar koşullarında kırma ve öğütme işlemleriyle üretilmiş, 63 µm elekten geçen kısım kullanılmıştır. Tüm karışımlarda bağlayıcı içeriği 550 kg/m³, su içeriği 193 kg/m³ ve su/bağlayıcı oranı 0,35 olarak sabit tutulmuştur. Taze hâl performansı, EFNARC kılavuzlarına uygun mini yayılma deneyi ile belirlenmiştir. Kontrol karışımının yayılma çapı 260 mm'dir. İkame karışımlarında yayılma değerleri 240 ile 260 mm arasında kalmış ve referans yayılmanın %92,3 ile %100'ü korunmuştur. ABT+AST ikili sistemi ile ABT+ATT+AST üçlü sistemi en kararlı davranışı göstermiştir. ABT+ATT ikili sistemi ise en düşük grup ortalamasını vermiştir. Sonuçlar, işlenebilirliğin yalnızca toplam ikame oranına değil, toz kombinasyonuna da bağlı olduğunu göstermektedir. Bulgular, bu atık tozların KYH üretiminde sürdürülebilir kısmi çimento ikame malzemeleri olarak kullanılabileceğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: atık bims tozu, atık seramik tozu, atık tuğla tozu, kendiliğinden yerleşen harç, yayılma deneyi.

Abstract

This study examines the effect of waste pumice powder (WPP) on the fresh-state properties of self-compacting mortars (SCMs) in single, binary and ternary waste powder systems. CEM II 42.5 R cement was partially replaced with WPP alone or with waste brick powder (WBP) and waste ceramic powder (WCP). Thirteen mixtures were prepared. These included one control mixture and twelve replacement mixtures with total replacement levels of 10%, 12.5% and 15%. The waste powders were produced by laboratory crushing and grinding. Only the fraction passing the 63 µm sieve was used. Total binder content, water content and water-to-binder ratio were kept constant at 550 kg/m³, 193 kg/m³ and 0.35, respectively. Fresh-state performance was evaluated using the mini slump-flow test according to EFNARC guidelines. The control mixture reached a flow spread of 260 mm. All replacement mixtures remained between 240 and 260 mm, retaining 92.3% to 100% of the reference flow. The WPP+WCP binary system and the WPP+WBP+WCP ternary system showed the most

stable response. The WPP+WBP binary system gave the lowest group mean. The results indicate that workability depends on both the total replacement level and the powder combination. These findings support the use of the investigated waste powders as sustainable partial cement replacements in SCM production.

Keywords: waste pumice powder, waste ceramic powder, waste brick powder, self-compacting mortar, slump-flow.

INTRODUCTION

The cement industry is responsible for approximately 7–8% of global anthropogenic CO₂ emissions (Andrew, 2018; Scrivener et al., 2018). This share is mainly driven by limestone calcination and the high-temperature clinkering process. Global cement output already exceeds four billion tons per year. Partial replacement of clinker with supplementary cementitious materials is therefore considered the most scalable way to decarbonize cementitious composites (Juenger et al., 2019).

A complementary motivation arises from construction and demolition waste (CDW). CDW streams are dominated by fired-clay bricks, ceramic tiles and mortar residues. These streams exceed three billion tons per year and are largely landfilled (Akhtar & Sarmah, 2018). Two of the waste powders used in the present study (waste brick powder and waste ceramic powder) are derived directly from this stream. The use of such waste-derived powders as partial cement replacements therefore addresses two issues at the same time. It reduces clinker demand and diverts CDW from landfill. This double benefit aligns material engineering with the circular-economy principles of the modern construction sector.

Self-compacting mortars (SCMs) are based on the framework introduced by Okamura and Ouchi (2003). They require a careful balance between deformability, viscosity and segregation resistance. This balance is achieved with high powder content and a low water-to-binder ratio. The slump-flow diameter (standardized by EFNARC, 2002, 2005) is the most common descriptor of unconfined filling ability. It is also very sensitive to the morphology, fineness and water demand of the fine fraction. As a result, any substitution of clinker by an alternative powder directly affects the fresh-state response. This response must therefore be evaluated experimentally and not predicted from chemical composition alone (Domone, 2006).

Among candidate waste-derived powders, three materials show clearly different physical signatures. Waste pumice powder (WPP) is of volcanic origin. It has a highly vesicular microstructure and a high water absorption capacity (Hossain, 2005; Karataş et al., 2017). Waste brick powder (WBP) is obtained from crushed fired-clay masonry. It has an angular shape and a rough surface texture, which tend to raise interparticle friction and reduce workability (Naceri & Hamina, 2009; Schackow et al., 2015). Waste ceramic powder (WCP) is derived from tile manufacturing residues. It is dense, vitrified and relatively smooth, with low water absorption. WCP often produces a flow-favorable ball-bearing effect within the fresh paste (Pacheco-Torgal & Jalali, 2010). The contrast between porous, angular and smooth geometries makes the combined behavior of these three powders particularly relevant for sustainable self-compacting matrices.

Despite the growing literature on each powder, three gaps remain. First, most studies investigate WPP, WBP and WCP in isolation. The interaction between porous, angular and smooth waste-derived fines is largely unexplored. Second, when binary or ternary systems are reported, the water-to-binder ratio or the superplasticizer dosage is often changed together with the replacement level. This confounds the intrinsic effect of the powder with that of the mixing water or admixture. Third, the simultaneous use of WPP, WBP and WCP within a single experimental matrix has not been systematically resolved.

The present study addresses this gap. It investigates the fresh-state filling ability of self-compacting mortars that incorporate WPP, WBP and WCP. The powders are used in single, binary and ternary configurations. Total cement-replacement levels are 10%, 12.5% and 15% by mass of binder. The originality of the work lies in the strict control of the experimental framework. The water content (193 kg/m³), water-to-binder ratio (0.35), binder content (550 kg/m³), aggregate skeleton and polycarboxylate superplasticizer dosage are held constant across all thirteen mixtures. Any variation in the mini slump-flow response can therefore be directly attributed to the type and quantity of the waste powder. The interpretation focuses on the physical and geometric phenomena (water absorption, interparticle friction and particle packing) that govern fresh-state behavior. The study thus provides a controlled baseline for the future development of low-clinker self-compacting cementitious composites within a circular-economy framework.

MATERIALS AND METHODS

Experimental Programme

The experimental programme was designed to evaluate the influence of waste pumice powder on the slump-flow behavior of self-compacting mortars (SCMs). WPP was used alone and in binary and ternary combinations with waste brick powder and waste ceramic powder. SCMs are characterized by their ability to flow and consolidate under their own weight without external compaction. This property was first formalized for self-compacting concrete by Okamura and Ouchi (2003) and was later codified for fresh-state assessment in the European guidelines (EFNARC, 2002, 2005). The slump-flow test is the most widely accepted indicator of filling ability. It is therefore adopted here as the primary response variable.

Thirteen mortar mixtures were produced and tested. One was a control mixture (CTRL) prepared with CEM II 42.5 R cement only. Twelve were replacement mixtures in which a fraction of the cement was substituted by one or more waste powders. The waste powders were waste pumice powder (WPP), waste brick powder (WBP) and waste ceramic powder (WCP). Three total replacement levels were investigated (10%, 12.5% and 15%) under three different waste powder configurations. The single waste powder system used WPP alone. The binary waste powder combinations used WPP together with either WBP or WCP. The ternary waste powder combination used WPP together with both WBP and WCP. The water content, water-to-binder ratio, binder content, aggregate type, superplasticizer type and superplasticizer dosage were held constant across all mixtures. Any variation in the measured slump-flow diameter could therefore be attributed primarily to the type and dosage of waste powder.

Constituent Materials

The binder of the control mortar was CEM II 42.5 R Portland-composite cement, classified in EN 197-1 and supplied by a single producer to limit batch-to-batch variability. The fine aggregate was

crushed stone with a maximum nominal particle size of 0.50 mm. The same aggregate was used in all mixtures so that aggregate-related effects on flowability would not interfere with the comparison between waste powders. The mixing water was potable tap water, used at a constant content of 193 kg/m³. The chemical admixture was a third-generation polycarboxylate-based superplasticizer (Sika ViscoCrete-5857 Hi-Tech, Sika Yapı Kimyasalları A.Ş., Türkiye). The superplasticizer was used to ensure adequate flowability while maintaining the prescribed water-to-binder ratio.

Three waste powders were used as partial cement replacements. Pumice is a porous, amorphous volcanic material. When ground to sufficient fineness, it has been reported to show pozzolanic behavior and to be of interest as a supplementary cementitious material (Karataş et al., 2017). Fired-clay brick waste contains amorphous aluminosilicate phases generated during firing. It has likewise been reported to display pozzolanic activity that is sensitive to fineness and replacement level (Naceri & Hamina, 2009). Ceramic waste is also produced from the firing of clay-based bodies. It has been reported to behave as a slow-reacting pozzolan whose contribution becomes more apparent at later ages (Pacheco-Torgal & Jalali, 2010). In the present study, the assumption of pozzolanic reactivity is not invoked to interpret the fresh-state results. The waste powders are treated as fine powders whose effect on slump-flow behavior is interpreted on the basis of their physical characteristics (particle morphology, fineness and water demand) rather than any assumed chemical reactivity.

Preparation of Waste Powders

The three waste powders (WPP, WBP and WCP) were produced under laboratory conditions. Pumice, brick and ceramic materials were crushed and ground in a Los Angeles abrasion machine. These materials are common constituents of construction and demolition waste streams. Their laboratory-based processing was preferred in order to minimize source-related variability. It also allowed the effect of waste powder type and replacement level on the fresh-state response to be evaluated in a systematic manner. Each material was crushed and ground separately. The resulting powders were further processed until they passed through a 63 µm sieve. The 63 µm threshold is the residue limit commonly applied to characterize the fine fraction of powders intended for use in cementitious systems. Only the fraction passing the 63 µm sieve was retained for use in the mortar mixtures. The oversize fraction was returned to the grinding step. Each powder was stored in sealed containers prior to mixing in order to limit moisture uptake and cross-contamination. No chemical, thermal or further mechanical activation was applied. The raw materials used for the subsequent specimens are shown in Figure 1.



Figure 1. Waste powders used in the experimental programme.

Mixture Proportions and Replacement Strategy

A total of thirteen mortar mixtures were prepared. One was the control mortar (CTRL) and twelve were waste-powder mortars. The control mortar was designed with a binder content of 550 kg/m³, a water content of 193 kg/m³ and a corresponding water-to-binder ratio of 0.35. This proportioning is consistent with the powder-rich, low-water-content philosophy of self-compacting mortars (Okamura & Ouchi, 2003; EFNARC, 2005).

In the waste-powder mortars, a fraction of the CEM II 42.5 R cement was replaced by waste powder at three total replacement levels (10%, 12.5% and 15% by weight of total binder). Three different waste powder configurations were used. In the single waste powder system, WPP was used as the sole cement replacement at 10%, 12.5% and 15%. In the binary waste powder combinations, WBP or WCP was kept constant at 2.5% of the binder. WPP was then varied as 7.5%, 10% and 12.5% to reach the target totals. In the ternary waste powder combination, both WBP and WCP were kept constant at 2.5% each. WPP was varied as 5%, 7.5% and 10% for the same target totals. This design was adopted in order to keep WBP and WCP at fixed minor proportions while systematically varying WPP as the principal cement replacement. It also isolated the influence of WPP within different powder environments. The replacement was carried out on a mass-for-mass basis. The total binder mass, water content, fine aggregate, and superplasticizer type and dosage were held constant across all thirteen mixtures. This kept the effect of the type and quantity of waste powder isolated. The full mixture proportions and the labelling system are summarized in Table 1. The selected replacement levels (10%, 12.5% and 15%) are within the range commonly investigated in the literature for similar waste powders as partial cement replacements (Pacheco-Torgal & Jalali, 2010; Karataş et al., 2017; Naceri & Hamina, 2009).

Table 1. Mixture proportions of the thirteen self-compacting mortars (per 1 m³).

Mix ID	WPP (%)	WBP (%)	WCP (%)	Total (%)	Cement (kg/m ³)	WPP (kg/m ³)	WBP (kg/m ³)	WCP (kg/m ³)	Water (kg/m ³)	SP (kg/m ³)	Fine Agg. (kg/m ³)
CTRL	0	0	0	0	550	—	—	—	193	6.59	1611
WPP10	10	0	0	10	494.99	55.01	—	—	193	6.09	1595
WPP12.5	12.5	0	0	12.5	481.26	68.74	—	—	193	6.09	1595
WPP15	15	0	0	15	467.5	82.5	—	—	193	6.09	1595
WPP-WBP10	7.5	2.5	0	10	494.99	41.24	13.75	—	193	6.09	1595
WPP-WBP12.5	10	2.5	0	12.5	481.24	55.01	13.75	—	193	6.09	1595
WPP-WBP15	12.5	2.5	0	15	467.5	68.76	13.75	—	193	6.09	1595
WPP-WCP10	7.5	0	2.5	10	494.99	41.24	—	13.75	193	6.09	1595
WPP-WCP12.5	10	0	2.5	12.5	481.24	55.01	—	13.75	193	6.09	1595
WPP-WCP15	12.5	0	2.5	15	467.5	68.76	—	13.75	193	6.09	1595
WPP-WBP-WCP10	5	2.5	2.5	10	494.99	27.49	13.75	13.75	193	6.09	1595
WPP-WBP-WCP12.5	7.5	2.5	2.5	12.5	481.24	41.24	13.75	13.75	193	6.09	1595
WPP-WBP-WCP15	10	2.5	2.5	15	467.5	55.01	13.75	13.75	193	6.09	1595

Mixing Procedure

All mixtures were prepared in a 3 L laboratory cement mixer. A uniform mixing protocol was followed, consistent with common practice for self-compacting mortars (Karataş et al., 2017; EFNARC, 2005). The polycarboxylate-based superplasticizer (Sika ViscoCrete-5857 Hi-Tech, Sika Yapı Kimyasalları A.Ş., Türkiye) was used at 6.59 kg/m³ for the control mixture and 6.09 kg/m³ for the replacement mixtures. These dosages correspond to 1.20% and 1.11% by weight of binder, respectively. All tests were conducted at a laboratory ambient temperature of approximately 21 °C.

Fresh-State Testing Procedure

The fresh-state behavior of each mixture was assessed by the mini slump-flow test. The test was performed in accordance with EFNARC recommendations (EFNARC, 2002, 2005). The mini slump-flow test is a scaled-down version of the standard slump-flow test. It is widely adopted for self-compacting mortars because the smaller specimen volume is better matched to paste- and mortar-scale formulations.

Immediately after mixing, the fresh mortar was placed in the mini-slump cone. The cone was positioned at the center of a clean, levelled and non-absorbent flow plate. It was filled in a single operation, without tamping or vibration, and excess material was struck off from the top. The cone was then lifted vertically in a smooth, continuous motion. This allowed the mortar to spread freely under its own weight. Once flow had ceased, two perpendicular diameters of the resulting circular spread were measured to the nearest millimeter. Their arithmetic mean was reported as the slump-flow diameter of the mixture. The same operator performed all tests, using the same equipment, in order to limit operator-dependent variability. The mini-slump cone used in this study was the standard EFNARC mini cone (top diameter 70 mm, bottom diameter 100 mm and height 60 mm). For each mixture, a single slump-flow measurement was recorded.

Methodological Limitations

The experimental programme is focused on a single fresh-state response (the mini slump-flow diameter). It also focuses on the systematic comparison of one control and twelve waste-powder mortars at three replacement levels. Within this scope, several aspects are deliberately left for further characterization.

First, the chemical (XRF), mineralogical (XRD), morphological (SEM) and physical descriptors (specific gravity, Blaine fineness, full particle-size distribution) of WPP, WBP and WCP have not been determined here. Therefore no quantitative claims are made about the pozzolanic activity of the three powders. Where the literature is cited, it is used only to motivate the use of these powders as candidate cement-replacement materials. It is not used as evidence that the specific powders used here are themselves pozzolanically reactive. Second, the present study refers to fresh-state properties only through the slump-flow test. The slump-flow test characterizes filling ability but does not, on its own, evaluate viscosity, passing ability or segregation resistance (EFNARC, 2005). The interpretation in the following section is therefore restricted to filling-ability behavior as a representative indicator of the fresh-state response.

RESULTS AND DISCUSSION

Fresh-State Workability and Slump-Flow Response

The fresh-state workability of the self-compacting mortars was assessed by the mini slump-flow test. The test provides a single-parameter measure of the unconfined deformability and filling ability of the fresh mixtures under their own weight. A representative slump-flow result is shown in Figure 2 for a mixture whose spread is close to the reference value of 260 mm. The complete set of measured slump-flow diameters is summarized in Table 2 together with their deviation from the reference value (Δ vs. CTRL) and the corresponding flow-retention ratios. The same data are visualized in Figure 3.



Figure 2. Representative mini slump-flow spread of a self-compacting mortar (spread close to the 260 mm reference value).

The present investigation did not include rotational rheometry, V-funnel, T500, J-ring or sieve-segregation tests. Mineralogical or surface-area characterization (XRF, XRD, Blaine fineness) was also not performed. No quantitative inferences are drawn here regarding yield stress, plastic viscosity, passing ability, segregation resistance or pozzolanic reactivity. The discussion that follows is therefore restricted to the slump-flow response and to the physical mechanisms that can be inferred from it.

Table 2. Slump-flow performance of the investigated mortars relative to the reference mixture.

Mixture ID	System Type	Replacement (%)	Slump-Flow (mm)	Δ vs. CTRL (mm)	Flow Retention (%)
CTRL	Reference	0	260	0	100
WPP10	Single	10	240	-20	92.3
WPP12.5	Single	12.5	260	0	100
WPP15	Single	15	255	-5	98.1
WPP-WBP10	Binary	10	255	-5	98.1
WPP-WBP12.5	Binary	12.5	240	-20	92.3
WPP-WBP15	Binary	15	250	-10	96.2
WPP-WCP10	Binary	10	260	0	100
WPP-WCP12.5	Binary	12.5	255	-5	98.1
WPP-WCP15	Binary	15	250	-10	96.2
WPP-WBP-WCP10	Ternary	10	260	0	100
WPP-WBP-WCP12.5	Ternary	12.5	250	-10	96.2
WPP-WBP-WCP15	Ternary	15	255	-5	98.1

The reference mixture (CTRL) was produced with 100% CEM II 42.5 R cement and without any cement replacement. It exhibited a slump-flow diameter of 260 mm. This value served as the upper-bound benchmark of the experimental matrix and as the reference value against which all modified mortars were compared. The water content was held constant at 193 kg/m³, the water-to-binder ratio at 0.35 and the polycarboxylate-based superplasticizer dosage at 1.11% by weight of binder. The fresh-state variations reported below therefore reflect the influence of the waste-powder substitution itself. They do not reflect any concurrent adjustment of the mixing-water or admixture demand.

All twelve waste-powder mixtures produced slump-flow diameters within a narrow envelope of 240–260 mm. The corresponding flow-retention ratios were between 92.3% and 100% relative to the control mixture. The lowest retention value (92.3%) was recorded for the WPP10 and WPP-WBP12.5 mixtures. Both mixtures showed a deviation of -20 mm from the reference. Full flow retention (100%) was reached by WPP12.5, WPP-WCP10 and WPP-WBP-WCP10. None of the mixtures showed visual signs of bleeding, paste segregation or halo formation during spreading. The limited variation between the lowest and highest spreads is technically meaningful. It indicates that the mixture proportions, superplasticizer dosage and water-to-binder ratio adopted here were robust enough to accommodate the altered particle interactions introduced by progressive cement substitution. This is true even though the three waste powders have very different morphological and physical features. The preservation of acceptable filling ability up to a total replacement level of 15% is the principal fresh-state outcome of the present investigation.

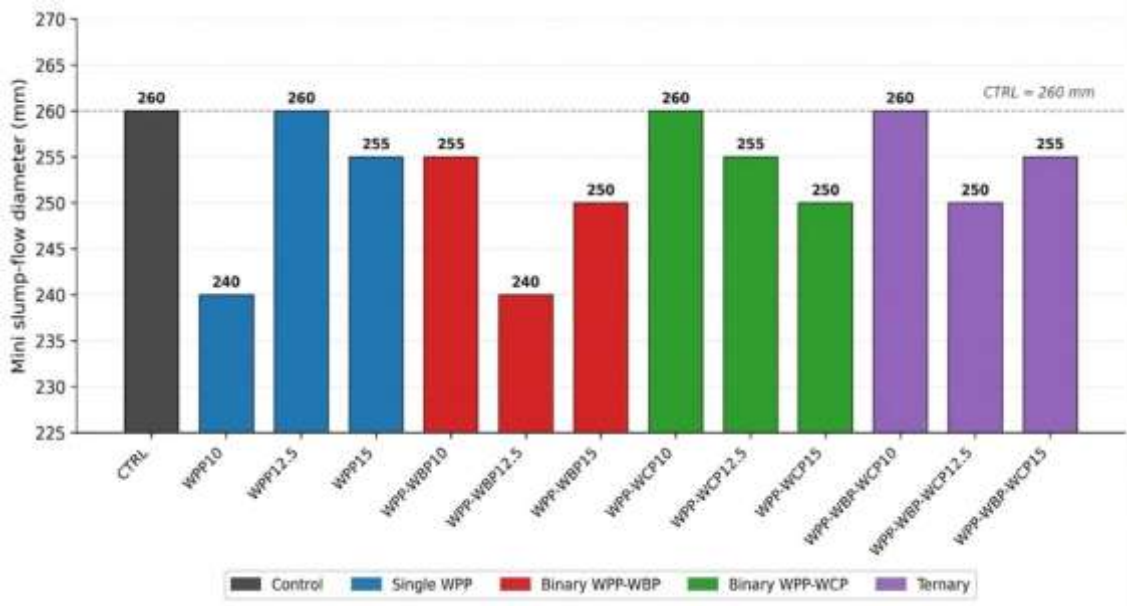


Figure 3. Mini slump-flow diameter of the thirteen self-compacting mortars. The dashed line marks the reference value of 260 mm.

Physical Mechanisms Governing the Flow Response

The differences in flowability observed across the various waste-powder systems cannot be attributed to a single factor. They arise from a coupled interaction among particle morphology, surface texture, powder fineness, instantaneous water absorption and the resulting interparticle friction within the fresh matrix. The mechanistic interpretation developed below is restricted to the physical and geometric phenomena that can be reasonably inferred from the slump-flow measurements. It does not invoke pozzolanic reactivity, chemical contribution to the binder system or quantitative rheological parameters (such as yield stress and plastic viscosity).

Single WPP Systems

In the single waste-powder system, WPP was the sole cement replacement. A clearly non-monotonic flow response was observed as the substitution level increased from 10% to 15%. At 10% replacement (WPP10), the spread dropped to its minimum value of 240 mm. This corresponds to a flow-retention ratio of 92.3% and represents the most pronounced reduction relative to the control mixture. This initial decline can be mainly ascribed to the highly vesicular, cellular microstructure of pumice particles. These particles have an extensive network of internal pores and an irregular, rough surface texture. When such particles enter the fresh matrix, a portion of the mixing water is rapidly drawn into the internal voids of the grains. This reduces the volume of free water available for lubrication of the granular skeleton and decreases the effective water-to-binder ratio. The high specific surface area and surface roughness of WPP further intensify interparticle friction. The two effects act together and produce the observed loss of flowability.

At 12.5% substitution (WPP12.5), the slump-flow diameter recovered fully to 260 mm (100% retention). It then declined slightly to 255 mm at 15% (WPP15). This non-linear recovery cannot be explained on the basis of water absorption alone. It is better interpreted through the framework of physical filler

effects and particle-packing optimization. As the volume of finely ground WPP increases, the smaller pumice particles progressively occupy the interstitial voids between the coarser cement grains. They displace previously entrapped water and convert it into free water. This free water then contributes to the lubricating paste film around the solid phase. The favorable response of WPP12.5 therefore reflects a regime in which the beneficial packing contribution of the porous powder temporarily outweighs its water-demand penalty. At 15% replacement, the growing dominance of the porous fraction once again raises the effective water demand and reintroduces a modest increase in internal friction. This produces the small decline observed in WPP15. A similar fresh-state response of self-compacting mortars containing ground pumice powder as cement replacement was also reported by Benli et al. (2017). This interpretation is broadly consistent with the observations of Karataş et al. (2017), who reported that optimized packing of porous volcanic precursors can compensate for their initial water-demand penalty when the replacement ratio is properly calibrated.

Binary WPP–WBP Systems

The binary WPP–WBP mixtures consistently produced lower slump-flow diameters than the other waste-powder systems. The recorded values were 255 mm, 240 mm and 250 mm at 10%, 12.5% and 15% replacement, respectively. The corresponding flow-retention ratios were 98.1%, 92.3% and 96.2%. The local minimum at 12.5% substitution is the lowest spread within the binary-system dataset. This behavior is mechanistically related to the distinctive physical characteristics of crushed brick powder. WBP particles are obtained by crushing fired clay products. They are typically angular, irregular and rough in microtexture. Unlike sub-rounded sand grains or smoother ceramic fines, the sharp edges of angular brick particles intensify mechanical interlocking. They also raise the resistance of the fresh paste to deformation during spreading.

In addition to morphology, the crushing process used to produce WBP generates a substantial fraction of ultra-fine particles. This increases the total specific surface area of the binder phase. A larger surface area in turn requires a larger volume of water to wet the particle interfaces. This raises the apparent water demand of the matrix and reduces the volume of free water available for lubrication. The combination of angularity-induced friction and surface-area-induced water demand operates at the same time as the absorptive behavior of the porous pumice fraction. The two effects together restrain the flow. The partial recovery observed at 15% replacement suggests that, beyond a critical threshold, the additional brick fines start to redistribute more uniformly within the particle skeleton. This slightly improves paste cohesiveness and stabilizes the flow response. The overall trend is consistent with the findings of Naceri and Hamina (2009). They reported that brick-derived powders depress fresh-state workability because of their irregular morphology and elevated water retention, even though their long-term contribution to mechanical and durability performance may remain favorable.

Binary WPP–WCP Systems

The binary WPP–WCP mixtures showed the most stable flow response across all investigated replacement levels. They produced slump-flow diameters of 260, 255 and 250 mm at 10%, 12.5% and 15% substitution, respectively. The corresponding retention ratios were 100%, 98.1% and 96.2%. The progressive but modest reduction in flowability with increasing WCP content reflects the comparatively favorable physical profile of ceramic-derived particles. Ceramic particles are typically denser, smoother and substantially less absorptive than either brick or pumice powders. These morphological features

lower the demand for free water. They also support an efficient filler action in which the ceramic fines occupy interstitial voids between cement and pumice particles, enhance the packing density of the powder skeleton and sustain paste mobility during the spreading process.

From a geometric and frictional perspective, the smoother surface texture of ceramic particles can be associated with a ball-bearing effect within the fresh paste. The more rounded character of the grains reduces interparticle friction and helps the relative displacement of solid components under the action of gravity. The combined WPP–WCP system therefore benefits from a clearly complementary interaction. The absorptive penalty introduced by porous pumice is partially offset by the more flow-favorable action of the ceramic component. This behavior agrees with the framework of Pacheco-Torgal and Jalali (2010), who noted that ceramic-based fines may preserve or even enhance the workability of fresh cement-based composites thanks to their low water absorption and favorable surface morphology compared with other clay-based wastes.

Ternary WPP–WBP–WCP Systems

The ternary mixtures incorporating all three waste powders occupied an intermediate but well-balanced position in the experimental dataset. They produced slump-flow diameters of 260, 250 and 255 mm at 10%, 12.5% and 15% replacement, respectively (retention ratios of 100%, 96.2% and 98.1%). The ternary system consistently matched or exceeded the corresponding WPP–WBP mortars. This indicates that the inclusion of ceramic powder partially neutralizes the detrimental flow influence of brick fines. Within this three-component assembly, each constituent contributes a distinct physical role. The porous pumice fraction provides internal water reservoirs. The angular brick fraction increases interparticle contact and friction. The smooth, low-absorption ceramic fraction acts as a flow stabilizer by improving particle dispersion and refining the granular packing.

The resulting paste therefore has a more homogeneous particle-size distribution. The negative effects of any single component are diluted by the geometric contributions of the others. The non-monotonic response (with the minimum at 12.5% and a partial recovery at 15%) further supports the interpretation that filler efficiency and granular packing evolve continuously with composition. They do not scale linearly with the replacement ratio. From a mix-design perspective, this synergistic behaviour is one of the principal advantages of ternary binder approaches over single-supplementary-material strategies. It allows the simultaneous exploitation of complementary physical properties while diluting the workability penalty of any individual waste-derived constituent.

Comparative Assessment and Sustainability Implications

Considering the replacement level as an independent variable, the dataset shows a recurring pattern. The transition from 10% to 12.5% substitution usually produces the most pronounced change in the slump-flow response. The further increase from 12.5% to 15% frequently results in a partial restoration or stabilization of flow. This indicates that the dominant governing mechanism is not a simple reduction in cement-paste volume. It is rather an evolving balance among water demand, packing density and interparticle friction. All three quantities are sensitive to the relative proportions of porous, angular and smooth particles within the binder phase. The retention of acceptable workability despite progressive cement reduction is therefore attributed to the synergistic redistribution of the fine fraction. In this redistribution, the waste powders together act as geometric and physical modifiers without exhausting the lubricating capacity of the paste.

The slump-flow diameters of all thirteen mixtures examined in this study remained within the narrow envelope of 240–260 mm. The flow-retention ratios remained above 92% with respect to the reference mixture in every case. This outcome indicates that the incorporation of WPP, WBP and WCP (whether used alone, in binary or in ternary combinations) at total replacement levels of up to 15% does not appreciably compromise the filling ability of the mortars relative to the CEM II 42.5 R reference. The finding is technically significant. It shows that a meaningful reduction in clinker demand can be achieved without additional chemical admixtures or modifications to the mixture proportioning. This outcome is consistent with the trend reported by Karataş et al. (2017) and Pacheco-Torgal and Jalali (2010), who similarly observed that judicious combinations of waste-derived mineral powders can sustain acceptable workability while reducing the environmental footprint of the binder.

From a sustainability perspective, the ability to partially replace Portland cement while preserving acceptable fresh-state filling ability has substantial environmental implications. Cement production remains one of the principal anthropogenic sources of carbon dioxide emissions. The valorization of construction- and industry-derived waste streams as supplementary mineral additions offers a dual benefit (clinker reduction and waste diversion from landfill). The present findings show that WPP, WBP and WCP can be co-used in self-compacting mortar systems up to a 15% total replacement level without compromising slump-flow performance. The WPP–WCP and ternary WPP–WBP–WCP combinations show the most promising fresh-state compatibility. They may therefore be considered viable candidate systems for the development of eco-efficient, low-clinker self-compacting cementitious composites within a circular-economy framework.

CONCLUSION

This study examined the fresh-state slump-flow behaviour of self-compacting mortars in which CEM II 42.5 R cement was partially replaced by waste pumice powder, waste brick powder and waste ceramic powder. The total replacement levels were 10%, 12.5% and 15% in single, binary and ternary configurations. The water-to-binder ratio, binder content, aggregate skeleton and superplasticizer dosage were held constant across all thirteen mixtures. The mini slump-flow test therefore isolated the contribution of waste-powder substitution to filling ability. The principal findings are summarized below.

All twelve waste-powder mortars retained slump-flow diameters within a narrow band of 240–260 mm. The corresponding flow-retention ratios were between 92.3% and 100% relative to the reference mixture. Acceptable filling ability was therefore preserved up to 15% cement replacement, without any adjustment to the mixture proportioning, water demand or admixture system. This confirms that the selected waste powders can be incorporated into SCMs without compromising the deformability criteria required for self-consolidation.

The flow response was governed by both the replacement level and the powder configuration. The binary WPP–WCP system and the ternary WPP–WBP–WCP system produced the most stable and consistent flow behavior. The binary WPP–WBP system gave the lowest group mean and the highest sensitivity to the replacement ratio. The single WPP system showed a non-monotonic response. An initial loss of flowability at 10% substitution was followed by full recovery at 12.5% and a modest decline at 15%.

These trends are coherently explained by the competition between three physical mechanisms. The first is the rapid water absorption of vesicular pumice grains. The second is the friction-enhancing effect of the angular and rough-textured brick particles. The third is the low-absorption, smooth-surfaced filler action of ceramic fines, which acts as a flow stabilizer through improved particle packing and granular dispersion. In the ternary configuration, the complementary roles of these three constituents dilute the workability penalty associated with any individual waste fraction.

From a sustainability standpoint, the preservation of fresh-state performance under up to 15% clinker reduction (achieved without modification of the mixture design) supports the feasibility of WPP-, WBP- and WCP-based mortars as eco-efficient candidates for low-clinker, circular-economy-oriented SCM production. This contributes to the mitigation of cement-related CO₂ emissions and to the valorization of construction and demolition waste streams.

The present investigation was deliberately limited to fresh-state filling ability. The mechanistic interpretations advanced here are engineering-level inferences derived from slump-flow data. Future work will consolidate this baseline through: (i) chemical and mineralogical characterization of the waste powders by XRF and XRD; (ii) morphological and fineness analyses via SEM, Blaine and particle-size distribution measurements; (iii) quantitative rheological assessment including rotational rheometry, V-funnel, T500, J-ring and sieve-segregation tests; and (iv) hardened-state evaluation of compressive and flexural strength, water absorption, capillary sorptivity and microstructure. These steps will help establish the long-term engineering viability of WPP-, WBP- and WCP-based binary and ternary self-compacting mortar systems.

REFERENCES

- Akhtar, A., & Sarmah, A. K. (2018). Construction and demolition waste generation and properties of recycled aggregate concrete: A global perspective. *Journal of Cleaner Production*, 186, 262–281. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.085>
- Andrew, R. M. (2018). Global CO₂ emissions from cement production, 1928–2017. *Earth System Science Data*, 10(4), 2213–2239. <https://doi.org/10.5194/essd-10-2213-2018>
- Benli, A., Karataş, M., & Sastim, M. V. (2017). Influence of ground pumice powder on the bond behavior of reinforcement and mechanical properties of self-compacting mortars. *Computers and Concrete*, 20(3), 283–290. <https://doi.org/10.12989/cac.2017.20.3.283>
- Domone, P. L. (2006). Self-compacting concrete: An analysis of 11 years of case studies. *Cement and Concrete Composites*, 28(2), 197–208. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2005.10.003>
- EFNARC. (2002). Specification and guidelines for self-compacting concrete. European Federation of National Associations Representing producers and applicators of specialist building products for Construction.
- EFNARC. (2005). The European guidelines for self-compacting concrete: Specification, production and use. BIBM, CEMBUREAU, ERMCO, EFCA & EFNARC.

- Hossain, K. M. A. (2005). Volcanic ash and pumice as cement additives: Pozzolanic, alkali-silica reaction and autoclave expansion characteristics. *Cement and Concrete Research*, 35(6), 1141–1144. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.09.025>
- Juenger, M. C. G., Snellings, R., & Bernal, S. A. (2019). Supplementary cementitious materials: New sources, characterization, and performance insights. *Cement and Concrete Research*, 122, 257–273. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.05.008>
- Karataş, M., Benli, A., & Ergin, A. (2017). Influence of ground pumice powder on the mechanical properties and durability of self-compacting mortars. *Construction and Building Materials*, 150, 467–479. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.220>
- Naceri, A., & Hamina, M. C. (2009). Use of waste brick as a partial replacement of cement in mortar. *Waste Management*, 29(8), 2378–2384. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.03.026>
- Okamura, H., & Ouchi, M. (2003). Self-compacting concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 1(1), 5–15. <https://doi.org/10.3151/jact.1.5>
- Pacheco-Torgal, F., & Jalali, S. (2010). Reusing ceramic wastes in concrete. *Construction and Building Materials*, 24(5), 832–838. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.10.023>
- Schackow, A., Stringari, D., Senff, L., Correia, S. L., & Segadães, A. M. (2015). Influence of fired clay brick waste additions on the durability of mortars. *Cement and Concrete Composites*, 62, 82–89. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.04.019>
- Scrivener, K. L., John, V. M., & Gartner, E. M. (2018). Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. *Cement and Concrete Research*, 114, 2–26. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.015>

Episodic Memories of Childhood Homes: The Role of Spatial Triggers and Emotional Intensity

Özge Sena YILDIZ¹, Dilek YILDIZ ÖZKAN²

¹E-mail: yildizo23@itu.edu.tr; İstanbul Teknik Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimari Tasarım Bölümü, İstanbul / Türkiye.

²E-mail: yildiz1@itu.edu.tr; İstanbul Teknik Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimari Tasarım Bölümü, İstanbul/ Türkiye.

Özet

Bireyin hayatında ilk ve en yoğun biçimde deneyimlenen fiziksel çevre olan çocukluk evinin, yetişkinlikte de etkisini sürdüren duygusal haritaların, bilişsel şemaların ve mekansal beklentilerin oluşmasında belirleyici bir rolü vardır. Bu çalışma; hangi fiziksel mekansal öğelerin yetişkinlerin hatırlama süreçlerinde baskın tetikleyiciler olarak öne çıktığını, hangi duygusal kanalların çocukluk evi anılarını en güçlü biçimde desteklediğini ve farklı duygular ile anı canlılığının nasıl bir ilişki içinde olduğunu çevrimiçi anket yöntemiyle incelemeyi amaçlamaktadır. n=33 katılımcıyla yürütülen bulgular; dış mekanların, yarı-dış alanların ve geçiş mekanların en sık mekansal tetikleyiciler olarak öne çıktığını göstermektedir. Duyusal modaliteler arasında belirgin bir farklılaşma saptanmamış olup tüm duyular benzer ağırlıklı puanlar sergilemiştir. Duygu yoğunluğu ile anı canlılığının orta düzey anlamlı pozitif bir ilişki gösterdiği saptanmıştır. ($r_s=.385$, $p=.027$). Çalışma, bellek tabanlı tasarım yaklaşımına katkı sağlamayı hedeflemektedir.

Anahtar Kelimeler: Anı canlılığı, çocukluk evi, epizodik bellek, duygusal yoğunluk, mekânsal tetikleyiciler

Abstract

The childhood home, the first and most intensely experienced physical environment in an individual's life, plays a decisive role in the formation of emotional maps, cognitive schemas, and spatial expectations that persist into adulthood. This study aims to examine, using a survey data collection method, which physical-spatial elements stand out as dominant triggers in adults' recall processes, which sensory channels most strongly support childhood home memories, and how different emotions relate to memory vividness. The study, conducted with n=33 participants, show that outdoor spaces, semi-outdoor areas, and transitional spaces stand out as the most frequent spatial triggers. No significant differentiation was found among sensory modalities, and all senses exhibited similar weighted scores. A moderately significant positive correlation was found between emotional intensity and memory vividness ($r_s=.385$, $p=.027$). The study aims to contribute to the memory-based design approach.

Keywords: Childhood home, emotional intensity, episodic memory, memory vividness, spatial triggers

INTRODUCTION

The idea that space is not merely a passive stage for activity, but an active partner in experience and an organizer of memory (Stanković Aćić & Stupar, 2025) is particularly related to childhood environments. The home space, as the first environment of life, is the primary setting where an individual's emotional map and cognitive schemas are formed, holding a lasting influence on psychological development and the perception of space in adulthood (Özak & Gökmen, 2009; Sungur, 2024).

While existing studies have theorized the significance of childhood domestic environments for identity and memory formation (Bachelard, 1969; Özak & Gökmen, 2009; Sungur, 2024), and neuroscientific research has begun to map the neural correlates of spatial-emotional encoding (Karakas & Yildiz, 2019; Nanda et al., 2013), a systematic examination of which specific physical elements function as dominant episodic triggers and how their emotional intensity relates to memory vividness remains largely absent from the literature. This gap motivates the present study.

This study aims to address this gap through an empirically grounded, survey-based investigation of childhood home memories in an adult population. Three interrelated research questions guide the study:

- Which physical spatial elements of the childhood home emerge as dominant episodic triggers in adult recall?
- Which sensory modalities most strongly support the recall of childhood home memories?
- How do different emotions relate to the vividness of recalled childhood home memories?

The theoretical foundation of this study rests on two intersecting bodies of knowledge: phenomenological accounts of domestic space and neuroscientific models of episodic memory. Bachelard's (1969) seminal work on the poetics of space establishes the home as the primary site of intimate experience, arguing that domestic environments are not merely inhabited but deeply internalized, forming the basis of an individual's spatial imagination. Building on this, Cooper Marcus (1995) demonstrates that the childhood home functions as a psychological anchor, its spatial features becoming inseparable from the memories and emotions formed within them. Together, these frameworks position the physical environment not as a neutral backdrop but as an active constituent of autobiographical identity.

The connection between place and memory is considered integral; one cannot be understood without reference to the other (Treib, 2009). Architecture and built environments function as profound mnemonic devices that record and transmit aspects of culture and history. This interaction suggests that spaces are not passive containers of events but active participants in the encoding of autobiographical narratives. Embodied memory is deemed essential as the basis for remembering a space (Pallasmaa, 2005); spatial recall is triggered not only by visual recognition but by a multisensory re-living of the environment's tactile and atmospheric qualities. The childhood home becomes, in essence, a repository of memory (Stanković Aćić & Stupar, 2025).

At the neurological level, Tulving's (1983) distinction between episodic and semantic memory provides the conceptual basis for understanding how spatially situated personal experiences are encoded and retrieved as distinct from general knowledge. Episodic memories are bound to specific contexts, temporal, spatial, and emotional, making the physical environment a structural component of the memory trace itself. This is further supported by evidence that emotional arousal, mediated by amygdala activation, significantly enhances the consolidation of episodic memories (LaBar & Cabeza, 2006), and that olfactory cues, due to their direct anatomical connection to limbic structures, serve as particularly powerful retrieval triggers (Herz et al., 2004).

Following Tulving's (1972) foundational distinction, declarative memory is differentiated into episodic memory and semantic memory. Episodic memory allows human beings to consciously re-experience past events through autonoetic awareness, enabling mental time travel (Tulving, 2002). Emotion plays a chief role in this encoding: the amygdala modulates memory consolidation during emotionally significant experiences (LaBar & Cabeza, 2006), and high-arousal events are associated with greater phenomenological vividness during recall (Talarico, LaBar, & Rubin, 2004). Russell's (1980) Circumplex Model of Affect categorizes emotional responses along two axes: valence (positive vs. negative) and arousal/intensity (calm to excited).

This study contributes to three intersecting fields: environmental psychology, human-centered design, and architectural phenomenology. By systematically identifying physical spatial triggers and their mnemonic and emotional properties, it aims to establish an empirical foundation for a memory-based design approach, one that treats the user's spatial past as a structured and measurable design input.

METHODOLOGY

This study employs an online survey, integrating qualitative narrative data with quantitative affective and sensory measurements. Data were collected from 33 adult participants (n=33; 1 missing response on narrative items), recruited through snowball sampling via Google Forms.

The survey consists of six core components. Two open-ended questions capture a narrative description of the most vivid childhood home memory and the physical characteristics of the space in which it occurred. A sensory modality ranking matrix asks participants to prioritize five channels, visual, auditory, haptic, olfactory/taste, and kinaesthetic/bodily, in order of contribution to their recalled memory. Two Likert-scale items measure memory vividness (1-5) and emotional intensity (1-5), and one open-ended item captures the specific emotion felt. The procedure followed four phases: Priming, narrative retrieval, sensory rating, and emotional rating.

Two coding procedures were applied. Spatial coding: Narrative responses were analyzed using inductive thematic content analysis. Emotion coding: Open-ended responses were first coded with singular labels, then grouped into five higher-order categories based on Russell's (1980) circumplex model. For RQ3, Spearman rank correlation was applied between emotional intensity and vividness scores. Kruskal-Wallis test was used to compare vividness scores across emotion categories. Sensory modality data were analyzed descriptively using weighted scoring (1st=3 pts, 2nd=2 pts, 3rd=1 pt) due to incomplete ranking structure.

Table 1 summarizes the alignment between the study's research questions, the corresponding survey components, the type of data generated, and the analytical procedures used. This alignment was established to ensure methodological consistency between the conceptual aims of the study and the empirical structure of the survey. While RQ1 was addressed through qualitative open-ended narrative and spatial description data analyzed by thematic content analysis, RQ2 relied on ordinal ranking data examined through descriptive and weighted scoring procedures. RQ3 was investigated through quantitative vividness and emotion-related measures, analyzed using Spearman rank correlation and the Kruskal-Wallis test.

Table 1. Research Question, measure, data type and analysis

Research Question	Component	Data Type	Analysis
RQ1: Dominant physical triggers	Open-ended narrative and spatial description	Qualitative	Thematic content analysis
RQ2: Sensory modality dominance	Sensory ranking matrix	Ordinal	Descriptive / weighted scoring
RQ3: Emotion-vividness relationship	Vividness scale + emotion rating	Quantitative	Spearman rank correlation; Kruskal-Wallis test

Several methodological limitations should be acknowledged. The sample size (n=33) is small, limiting statistical power and the generalizability of findings. Participants were recruited via snowball sampling, which introduces self-selection bias and restricts representativeness. All data are based on self-report and retrospective recall, which are subject to memory reconstruction. Retrospective recall bias is a particular concern given the distance between childhood experiences and adult recollection. One missing response was recorded on the narrative items. Emotion categories with n<5 should be regarded as exploratory and interpreted with caution.

FINDINGS

RQ1- Spatial Triggers: Valid narratives (n=32; 1 missing) were analyzed through thematic content analysis. Multiple spatial elements per narrative were coded; percentages therefore exceed 100%.

When classified by spatial quality, outdoor spaces appeared in 11 narratives, transitional spaces (hall, staircase) in 7, semi-outdoor spaces (balcony, veranda) in 6, and purely interior spaces in 8 (Table 2). Outdoor, semi-outdoor, and transitional spaces together were prominent in most valid narratives. Garden and outdoor narratives consistently featured physical action and social togetherness; balcony narratives foregrounded sensory contact with nature and threshold experiences between interior and exterior. These patterns suggest that spaces offering bodily engagement, social interaction, and nature contact may carry heightened mnemonic salience.

Table 2. Spatial trigger categories, frequency, and percentage (n=32; multiple coding applied, percentages may exceed 100%).

Spatial Category	n	% (n=32)	Spatial Quality	Example Narrative
Garden / Outdoor Area	12	37.5%	Outdoor	the day we built a cardboard house among the trees
Balcony	6	18.8%	Semi-outdoor	I would lay out a rug on the balcony and play house
Room / Bedroom	5	15.6%	Interior-private	My own room, door closed, no sunlight
Kitchen / Dining Area	3	9.4%	Interior	from the kitchen you could see everything
Hall / Corridor	2	6.3%	Transitional	playing football in the hall
Staircase	2	6.3%	Transitional	I would fall going up and down the stairs
Living Room / Lounge	2	6.3%	Interior	jumping on the sofa
Sports Area / Park	4	12.5%	Outdoor	playing football on the pitch until midnight
Veranda	1	3.1%	Semi-outdoor	chatting with my father on the wide veranda
Other (singular)	8	--	Various	--

RQ2 Sensory Modalities: Participants ranked five sensory modalities as 1st, 2nd, or 3rd degree, selecting only those relevant to their memory. Due to the incomplete and asymmetric ranking structure, comparative parametric tests were not applied; analysis was kept at the descriptive level using weighted scoring (1st=3 pts, 2nd=2 pts, 3rd=1 pt).

Weighted totals ranged narrowly from 59 to 64 points, indicating no pronounced dominance of any single modality (Table 3). This pattern suggests that multiple sensory channels contribute jointly to childhood home recall, consistent with the multisensory memory literature (Pallasmaa, 2005; Tarçın Turgay & Tunçok Sarıberberoğlu, 2022). Olfactory/Taste achieved the highest weighted total (64 pts), consistent with the established potency of olfactory cues in autobiographical memory (Herz, 2004). Visual modality showed the highest number of 1st-degree selections (n=11) but also the most 3rd-degree placements (n=16), indicating considerable inter-participant heterogeneity. Kinesthetic/bodily modality was most frequently chosen in 2nd position (n=17), suggesting a consistently supportive but secondary role. These observations are exploratory and require larger-sample data for confirmation.

Table 3. Sensory modality degree distribution and descriptive statistics (n=33). Weighted total = 1st x3 + 2nd x2 + 3rd x1.

Modality	n selected	1st (n)	2nd (n)	3rd (n)	Wtd. Total	Mean	SD
Visual	33	11	6	16	61	1.85	0.91
Auditory	32	8	12	12	60	1.88	0.79
Haptic	32	7	16	9	62	1.94	0.72
Olfactory/Taste	32	11	10	11	64	2.00	0.84
Kinesthetic/Bodily	32	5	17	10	59	1.84	0.68

RQ3 — Emotion and Vividness: Open-ended emotion responses (n=32; 1 missing) were coded with singular labels, then grouped into five higher-order categories based on Russell's (1980) circumplex model.

Positive valence dominated the sample: Positive/calm (31.3%) and Positive/active (25.0%) together accounted for 56.3% of responses (Table 4), consistent with the selective positivity bias documented in nostalgic recall (Batcho, 2013; Sedikides et al., 2008).

Table 4. Emotion categories, frequency, and percentage (n=32).

Category	n	%	Singular emotions included
Positive/Calm	10	31.3%	happiness, peace, security
Positive/Active	8	25.0%	joy, excitement, ownership
Negative/Active	4	12.5%	fear, helplessness, loneliness
Mixed/Longing	4	12.5%	nostalgia, mixed emotions
Belonging/Attachment	3	9.4%	belonging, love, tenderness
Exploration/Curiosity	3	9.4%	curiosity, imagination, autonomy

Memory vividness across the full sample: M=4.09, SD=0.88, Mdn=4.0 (range: 2-5). Emotional intensity: M=4.15, SD=0.71, Mdn=4.0 (range: 3-5). Spearman rank correlation yielded a statistically significant, moderate positive relationship: $r_s=.385$, $p=.027$, $n=33$. This finding indicates that as emotional intensity increases, memory vividness tends to increase, consistent with neurobiological models linking amygdala activation to memory consolidation (LaBar & Cabeza, 2006; Talarico et al., 2004). The moderate effect size suggests that vividness is additionally determined by other variables.

Kruskal-Wallis test comparing vividness scores across emotion categories: $H(5)=4.998$, $p=.416$, $n=32$. Effect size: $\eta^2=.161$ (small-to-medium). No statistically significant difference was found. However, positive/active (Mdn=4.5) and positive/calm (Mdn=4.5) showed higher vividness than exploration/curiosity (Mdn=3.0), mixed/longing (Mdn=3.5), and negative/active (Mdn=3.5)(Table 5).

Table 5. Memory vividness descriptive statistics by emotion category (n=32). Categories with n<5 are exploratory.

Emotion Category	n	Mean	Median	SD	Min	Max	Note
Positive/Active	8	4.50	4.5	0.53	4	5	
Positive/Calm	10	4.40	4.5	0.70	3	5	
Belonging/Attachment	3	4.00	4.0	1.00	3	5	Exploratory (n<5)
Mixed/Longing	4	3.75	3.5	0.96	3	5	Exploratory (n<5)
Negative/Active	4	3.75	3.5	0.96	3	5	Exploratory (n<5)
Exploration/Curiosity	3	3.67	3.0	1.15	3	5	Exploratory (n<5)

The failure to reach statistical significance is likely attributable to small sample size. Findings from categories with n<5 should be treated as preliminary, warranting replication with a larger sample.

DISCUSSION AND CONCLUSION

This study provides an empirical account of how childhood domestic spaces are encoded as episodic memory through an online survey (n=33). The findings across three research questions map a progression from dominant spatial triggers, through sensory channels, to emotional dynamics that determine phenomenological quality.

With respect to RQ1, outdoor spaces, semi-outdoor areas, and transitional zones emerged as the most frequently recalled spatial triggers. Garden and balcony narratives consistently featured physical action, social togetherness, and sensory contact with nature.

The importance of outdoor, semi-outdoor, and transitional spaces may be explained by several factors. These spaces typically afford greater bodily autonomy and freedom of movement for children, who experience the world at a different physical scale than adults. Threshold spaces such as balconies, staircases, and corridors occupy a liminal position between the private domestic interior and the social exterior. The repetition of social togetherness in garden and outdoor narratives further suggests that spatial memory is not encoded in isolation but is co-constituted with social and relational experience. From an architectural practice, these findings may implicate that domestic design that prioritizes access to semi-outdoor and transitional zones, especially for child-scale inhabitation, may invest spaces with lasting mnemonic significance.

For RQ2, weighted totals did not indicate a pronounced dominance of any single modality. This pattern is broadly consistent with multisensory theory of architectural memory (Pallasmaa, 2005). The highest weighted total for olfactory/taste is consistent with the established potency of olfactory cues (Herz, 2004). The secondary but consistent role of kinesthetic/bodily modality supports embodied memory theory (Treib, 2009).

The absence of a distinct single-modality dominance is itself theoretically meaningful. It suggests that childhood home memories are multisensory events, encoded through simultaneous activation of multiple perceptual channels rather than through a single dominant sense (Turgay & Sarıberberoğlu,

2022). This is consistent with Pallasmaa's (2005) argument that architecture is experienced through the full body, not only through vision. The comparatively high weighted total for olfactory/taste, despite its lower 1st-degree frequency, aligns with Herz's (2004) findings on the disproportionate affective potency of olfactory memory cues. The high inter-participant variability in visual modality rankings further implies that the dominant sensory channel in childhood home recall may be idiosyncratic and context-dependent, shaped by individual developmental histories and specific spatial experiences rather than a universal sensory hierarchy.

For RQ3, emotional intensity showed a statistically significant moderate positive correlation with memory vividness, consistent with the neurobiological model linking amygdala activation to memory consolidation (LaBar & Cabeza, 2006). Positive valence categories were associated with higher median vividness scores, though the Kruskal-Wallis test did not reach significance, likely due to small sample size. These patterns are consistent with Talarico et al.'s (2004) finding that high-arousal events generate enhanced reliving experiences.

At a broader level, these findings contribute to environmental psychology, housing theory, user-centered design, and architectural phenomenology. By systematically identifying physical spatial triggers and their mnemonic and emotional qualities, the study establishes an empirical foundation for a memory-based design approach, a design approach that treats the individual's spatial past as a measurable design input (Eberhard, 2009; Sussman & Hollander, 2021).

Regarding the RQ3 finding that emotional intensity correlates significantly with memory vividness while emotion category does not, several explanatory factors should be considered. The Kruskal-Wallis test's failure to reach significance is most plausibly attributable to the small sample size and the resulting uneven and sparse cell distributions, with several categories containing fewer than five observations. Furthermore, the open-ended coding procedure, while grounded in Russell's (1980) circumplex model, necessarily produces some heterogeneity in how participants label emotional experiences, which may obscure systematic category-level differences in vividness. These results should therefore be interpreted as exploratory rather than confirmatory.

Together, the three findings present a coherent theoretical framework: episodic memories of childhood homes are spatially specific, multisensory, and emotionally amplified events, where memory vividness depends heavily on the intensity of the emotional experience rather than its specific categorical content.

These findings also suggest several directions for future research. Further studies with larger and more diverse samples may help test whether the prominence of outdoor, semi-outdoor, and transitional spaces remains stable across different housing types, socio-cultural contexts, and age groups. In addition, future research may build on the present findings by translating the spatial categories identified here into more structured comparative or experimental designs.

REFERENCES

Bachelard, G. (1969). *The poetics of space* (M. Jolas, Trans.). Boston: Beacon Press. (Original work published 1958)

- Batcho, K. I. (2013). Nostalgia: The bittersweet history of a psychological concept. *History of Psychology*, 16(3), 165-176.
- Cooper Marcus, C. (1995). *House as a mirror of self: Exploring the deeper meaning of home*. Berkeley, CA: Conari Press.
- Eberhard, J. P. (2009). *Brain landscape: The coexistence of neuroscience and architecture*. Oxford University Press.
- Herz, R. S. (2004). A naturalistic analysis of autobiographical memories triggered by olfactory, visual, and auditory stimuli. *Chemical Senses*, 29(3), 217-224.
- Herz, R. S., Eliassen, J., Beland, S., & Souza, T. (2004). Neuroimaging evidence for the emotional potency of odor-evoked memory. *Neuropsychologia*, 42(3), 371-378.
- Karakas, T., & Yildiz, D. (2019). Exploring the influence of the built environment on human experience. *Frontiers of Architectural Research*, 9(1), 236-247.
- LaBar, K. S., & Cabeza, R. (2006). Cognitive neuroscience of emotional memory. *Nature Reviews Neuroscience*, 7(1), 54-64.
- Nanda, U., Pati, D., Ghamari, H., & Bajema, R. (2013). Lessons from neuroscience: Form follows function, emotions follow form. *Intelligent Buildings International*, 5(S1), 61-78.
- Özak, N. Ö., & Gökmen, G. P. (2009). Bellek ve mekân ilişkisi üzerine bir model önerisi. *İTÜ Dergisi/a: Mimarlık, Planlama, Tasarım*, 8(2), 145-155.
- Pallasmaa, J. (2005). *The eyes of the skin: Architecture and the senses*. Chichester, UK: John Wiley & Sons.
- Russell, J. A. (1980). A circumplex model of affect. *Journal of Personality and Social Psychology*, 39(6), 1161-1178.
- Sedikides, C., Wildschut, T., Arndt, J., & Routledge, C. (2008). Nostalgia: Past, present, and future. *Current Directions in Psychological Science*, 17(5), 304-307.
- Stanković Ačić, J., & Stupar, D. (2025). The room as a starting point in architectural design: Childhood memory and the formation of spatial understanding. *AGG+ Journal for Architecture, Civil Engineering, Geodesy and Related Scientific Fields*, 13(1), 17-35.
- Sungur, M. (2024). Mekan ve bellek: Çocukluk evi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 26(4), 1949-1972.
- Sussman, A., & Hollander, J. B. (2021). *Cognitive architecture*. Routledge.
- Talarico, J. M., LaBar, K. S., & Rubin, D. C. (2004). Emotional intensity predicts autobiographical memory experience. *Memory & Cognition*, 32(7), 1118-1132.
- Tarçın Turgay, Z., & Tunçok Sarıberberoğlu, M. (2022). The role of the senses in children's perception of space. *ICONARP International Journal of Architecture and Planning*, 10(1), 70-96.
- Treib, M. (Ed.). (2009). *Spatial recall: Memory in architecture and landscape*. New York, NY: Routledge.

- Tulving, E. (1972). Episodic and semantic memory. In E. Tulving & W. Donaldson (Eds.), Organization of memory (pp. 381-403). New York, NY: Academic Press.
- Tulving, E. (1983). Elements of episodic memory. New York, NY: Oxford University Press.
- Tulving, E. (2002). Episodic memory: From mind to brain. Annual Review of Psychology, 53, 1-25.

Bitki Islahının Amaçları

Uğur TAN¹, Hatice Kübra GÖREN¹

ORCID ID: 0000-0002-9592-2790, 0000-0001-7654-1450

¹Aydın Adnan Menderes Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarla Bitkileri Bölümü, Aydın, TÜRKİYE

Özet

Bitki ıslahı, bitkilerin genetik yapısının insan gereksinimlerini karşılayacak şekilde değiştirilmesi ve geliştirilmesi olarak tanımlanmakta olup, tarımsal üretimin temel bileşenlerinden birini oluşturmaktadır. Islahın temel amacı, çok sayıda gen tarafından kontrol edilen kantitatif bir özellik olan verimin artırılmasıdır. Ancak verim artışı tek başına yeterli değildir; kalite, stabilite ve adaptasyon ile birlikte değerlendirilmelidir. Kalite olmadan yüksek verim ekonomik değer oluşturmazken, dayanıklılık ve adaptasyon eksikliği çeşitlerin tarla koşullarında başarısını ve yaygınlığını sınırlar.

Modern ıslah yaklaşımları; miktar, kalite, güvenlik ve verimlilik olmak üzere dört temel bileşen üzerine kuruludur. Bu bileşenler arasında kaçınılmaz denge ilişkileri bulunmakta olup, ıslah çalışmalarında tek bir özelliğin maksimize edilmesinden ziyade optimum dengenin sağlanması hedeflenmektedir. Bu kapsamda erkencilik, verim stabilitesi ve farklı çevre koşullarına uyum önemli ıslah hedefleri arasında yer almaktadır. Bununla birlikte hastalıklar, zararlılar ve yabancı otlar gibi biyotik streslere dayanıklılık ile kuraklık, sıcaklık, soğuk ve tuzluluk gibi abiyotik streslere tolerans, günümüz iklim koşullarında kritik öneme sahiptir.

Ayrıca mekanizasyona uygun bitki mimarisi, yatmaya dayanıklılık, tane dökülmesinin azaltılması ve eş zamanlı olgunlaşma gibi agronomik özellikler de dikkate alınmaktadır. Yeni çeşitlerin geliştirilmesinde farklılık, yeknesaklık ve durulmuşluk kriterlerinin sağlanması gereklidir. Sonuç olarak, ıslah programlarının amacı, yüksek verim potansiyeline sahip, stabil ve geniş adaptasyon yeteneği gösteren üstün genotiplerin geliştirilmesidir.

Anahtar Kelime: Bitki ıslahı, verim, kalite, stabilite, adaptasyon, abiyotik stres, biyotik stres

Goals of Plant Breeding

Abstract

Plant breeding is defined as the modification and improvement of plant genetic structures to meet human needs, constituting a fundamental component of agricultural production systems. The primary objective is to enhance yield, a quantitatively inherited trait controlled by multiple genes, and a key determinant of economic sustainability. However, yield improvement alone is insufficient; it must be considered together with quality, stability, and adaptability. High yield without quality lacks market value, while insufficient stress tolerance limits field performance and restricts adoption across environments.

Modern breeding strategies are structured around four principal components: quantity, quality, security, and efficiency. These components are interdependent and involve inherent trade-offs, requiring optimization rather than maximization of individual traits. In this context, breeding targets include early

maturity, yield stability, and improved adaptation to diverse environmental conditions. Additionally, resistance to biotic stresses such as diseases, pests, and weeds, as well as tolerance to abiotic stresses including drought, heat, cold, and salinity, are essential objectives under current climate variability.

Agronomic traits such as plant architecture suitable for mechanized harvesting, resistance to lodging, reduced grain loss, and synchronized maturity are also emphasized. Furthermore, the development of new cultivars requires compliance with distinctness, uniformity, and stability (DUS) criteria for official registration. Ultimately, effective breeding programs aim to develop superior genotypes that combine high yield potential with consistent performance across environments. The future of agriculture depends on the development of such adaptable and stable cultivars under changing climatic conditions.

Keywords: Plant breeding, yield, quality, stability, adaptation, abiotic stress, biotic stress

GİRİŞ

Bitki ıslahı, bitkilerin genetik yapılarının insan gereksinimlerini en üst düzeyde karşılayacak biçimde değiştirilmesi ve iyileştirilmesi bilimini temsil eder. Modern bitki ıslahı programları, küresel gıda güvenliğinin sağlanması, sanayi için standardizasyonu yüksek hammadde arzı ve değişen iklim koşullarında ekosistem hizmetlerinin korunması gibi üç temel ekolojik ve ekonomik misyonu yerine getirmek zorundadır. Tarımsal üretimin sürdürülebilirliği, agro-ekosistemlerin dinamik yapısı ile pazardaki endüstriyel taleplerin doğru analiz edilmesine bağlıdır.

Modern ıslah mimarisi, birbirini tamamlayan ve karar süreçlerini doğrudan yönlendiren dört temel stratejik sütun üzerine inşa edilmiştir. Bu sütunlardan ilki olan miktar birim alandan elde edilen verimin artırılmasını ve bu artışın farklı çevre koşullarında kararlılık (stabilite) göstermesini hedefler. Kalite boyutu ise ürünün besin değerinin (örneğin protein ve yağ içeriği) ve endüstriyel işlenebilirliğinin optimize edilmesini kapsar. Güvenlik, bitkilerin biyotik (hastalıklar, zararlılar) ve abiyotik (kuraklık, sıcaklık, tuzluluk vb.) stres faktörlerine karşı genetik dayanıklılığının artırılmasını ifade eder. Verimlilik ise bitki mimarisinin agronomik uygulamalara, kültürel işlemlere ve modern mekanizasyon sistemlerine uyumlu hale getirilmesini içerir. Bu dört sütun, modern bitki ıslahında birbirinden bağımsız değil, aksine eş zamanlı olarak optimize edilmesi gereken bütüncül bir sistemin parçalarıdır. Bitki ıslahı süreçleri doğası gereği bir denge oyunudur. Çoğu zaman verimi artırmak kalite parametrelerini baskılayabilir; ya da ekstrem bir strese dayanıklılık mekanizması, bitkinin enerjisini savunmaya harcamasından ötürü potansiyel verimden ödün vermeyi gerektirebilir. Islahçının temel amacı, bu negatif korelasyonları genetik araçlarla kırarak optimum dengeyi yakalamaktır.

Verimlilik ve Stabilite

Bitki ıslahının hiyerarşik merkezinde yer alan temel amaç, belirli çevrelerde yüksek verim elde etmek ve bu verimi zaman içinde koruyabilmektir. Ancak çevresel değişkenlik ve genotip-çevre (GE) etkileşimi nedeniyle, tek bir çevrede elde edilen yüksek verim her durumda genetik olarak güvenilir değildir; bu nedenle çok ortamlı ve çok parametrelili değerlendirilmeler zorunludur (Dias, 2015; Anders ve ark., 2021; Muntean ve ark., 2022). GE etkileşimi nedeniyle stabil yanıtlar elde etmek amacıyla,

farklı çevrelerde tekrarlanabilir verim ölçümlerine ihtiyaç duyulduğundan fenotipik kayıtlar tek başına yeterli olmayabilir (Abou-Khater ve ark., 2022; Balech ve ark., 2023; Crosta ve ark., 2023).

Tarihsel süreçte bu durumun en net örneği Yeşil Devrim döneminde görülmüştür. Dr. Norman Borlaug tarafından bodurluk (*Rht*) genlerinin buğdaya aktarılmasıyla, gübre tepkisi yüksek ve yatmaya dayanıklı çeşitler geliştirilmiştir (Borlaug, 1968). Bu dönüşüm sayesinde Meksika'da 1945 yılında 75 kg/da olan birim alan buğday verimi, 1967 yılında 279 kg/da düzeyine çıkmıştır. Günümüzde ise bu verim potansiyelinin korunması, geniş ve spesifik adaptasyon kabiliyetlerinin doğru analiz edilmesine bağlıdır (Finlay ve Wilkinson, 1963; Eberhart ve Russell, 1966).

Genom tabanlı yaklaşımlar (genomik seçim gibi) fenotipik verileri destekleyerek çok sayıda poligenik traitte daha güvenilir tahminler sağlamakta ve özellikle düşük kalıtım oranına sahip karakterlerde riskleri azaltmaktadır (Fugerey-Scarbel ve ark., 2021; Şahin ve ark., 2023). Ancak fenotipik veriler olmadan veya yalnızca tek bir trait'e dayanılarak yapılan seçimler, GE etkileşimini görmezden gelerek verimde dalgalanmaya sebep olmaktadır (Sergievskikh ve ark., 2022; Anders ve ark., 2021).

Artan sıcaklıklar, yağış değişkenliği ve CO₂ düzeylerindeki artış gibi iklim değişikliği baskıları altında bitkilerin yeni çevresel koşullara adapte olması kritik hale gelmiştir. Bu nedenle modern ıslahın temel gayesi, farklı iklim senaryolarında verimi ve kaliteyi koruyacak veya artıracak çeşitler geliştirmektir. Periyodik olarak değişen iklimlere uyum sağlayan ve streslere dayanıklı tarla ve yem bitkileri için adaptasyon odaklı stratejik hedefler belirlenmektedir (Dias, 2015; Anders ve ark., 2021; Afzal ve ark., 2023). Bu çerçevede çok-özellikli (multi-trait) hedefler ile karakterler arasındaki ilişkilerin (örneğin, su kullanımı verimliliği, besin utilizasyonu ve kök sistemi mimarisi) optimize edilmesi amaçlanmaktadır (Turner ve ark., 2019; Muntean ve ark., 2022).

Biyotik ve Abiyotik Stres Yönetimi

Sürdürülebilirlik açısından biyolojik çeşitlilik, ekosistem hizmetleri ve tarımsal güvenlik de ıslah hedefleriyle iç içe yürütülmektedir; bu bağlamda çeşitlilik çoğaltımı ile geleneksel ve modern ıslah yaklaşımlarının entegrasyonu zorunlu görülmektedir (Fugerey-Scarbel ve ark., 2021; Gepts, 2023). Islah programlarında hedef alınan temel stres faktörleri şunlardır:

Bitki ıslahında sürdürülebilir üretimin sağlanabilmesi için biyotik ve abiyotik stres faktörlerine karşı dayanıklılığın geliştirilmesi temel hedeflerden biridir. Biyotik stresler kapsamında mantar hastalıkları (pas, sürme), bakteriler, virüsler, böcekler ve parazitik yabancı otlar (örneğin *Orobanche* spp.) önemli verim kayıplarına yol açmakta olup, bu etmenlere karşı R-genleri aracılığıyla genetik direnç oluşturulması ıslah programlarının öncelikli amaçları arasında yer almaktadır. Buna karşılık abiyotik stresler, iklim değişikliği bağlamında giderek daha belirleyici hâle gelmiş olup kuraklık, yüksek sıcaklık şokları, kışa dayanıklılık (winter hardiness) ve özellikle yoğun sulama yapılan alanlarda ortaya çıkan tuzluluk (salinity) gibi faktörler bitkisel üretimi doğrudan sınırlamaktadır. Bu nedenle modern ıslah stratejileri, söz konusu stres faktörlerine karşı tolerans mekanizmalarını güçlendiren genotiplerin geliştirilmesine odaklanmaktadır (Babiker ve ark., 2024; Franguelli ve ark., 2025).

Üretkenlik Ve Kalite Arasındaki Denge

Genotiplerin birim alan verimliliği dışında, tarımsal ürünlerin kalite özellikleri de (örneğin ekmeklik buğdayda gluten/protein kalitesi, pamukta lif mukavemeti, yağ bitkilerinde oleik/linoleik asit kompozisyonu) üretkenlikle birlikte eş zamanlı olarak hedeflenir. Çoklu hedefli seleksiyon indeksleri ve ekonomik katsayılar bu dengenin pratikte uygulanabilir hale getirilmesini sağlamaktadır; böylece belirli bir üretim sisteminde ekonomik olarak en avantajlı özellikler önceliklendirilebilmektedir (Christinck ve Weltzien, 2013; Tırpan ve Tekin, 2018; Rognli ve ark., 2021; Şen ve Savaş, 2021). Bu yaklaşım, ıslah programlarını yalnızca yüksek biyolojik verim elde etmek yerine, pazarın ve endüstrinin talep ettiği standartlarda düzenli ve sürdürülebilir çıktı sağlayan işlemlere yönelmektedir (Tablo 1).

Tablo 1: Bitki Türlerine Göre Öncelikli Islah Kalite Kriterleri ve Seleksiyon Hedefleri

Ürün Grubu	Tür / Kullanım Amacı	Kritik Kalite Kriterleri (Breeding Targets)
Hububat	Ekmeklik Buğday	Yüksek protein oranı, gluten kalitesi, sedimantasyon değeri.
	Makarnalık Buğday	Camsılık oranı, irmik rengi (sarı pigment karotenoid içeriği).
	Arpa (Maltlık / Yemlik)	Maltlık için düşük protein ve yüksek nişasta; yemlik için dengeli aminoasit profili.
Endüstri	Pamuk / Şeker Pancarı	Pamukta lif uzunluğu (length) ve mukavemeti; pancarda polarizasyon (şeker oranı).
Yağlı Tohum	Yağ Bitkileri (Soya vb.)	Yağ/protein kompozisyonu, düşük erusik asit ve oleik asit dengesi.

Geleneksel “tek özellikli” (single-trait) bakış açıları çoğu senaryoda sınırlıdır; özellikle karmaşık fenotipik özelliklerin (örneğin tek başına tane verimi ya da tek başına yağ oranı) tek başına yüksek bir ayırt edici (discriminant) olması beklenemez. Bu nedenle fenotipik veriler, çoklu özellikler (multi-trait) ve Çok Ortamlı (multi-environment) testlerle bütünleşmelidir (Dias, 2015; Anders ve ark., 2021; Muntean ve ark., 2022). Ayrıca inter- ve intra-popülasyon çeşitliliğini korumak amacıyla biyolojik çeşitlilik ve sürdürülebilir tarım hedefleri ile uyumlu entegre stratejiler geliştirilmelidir (Fugerey-Scarbel ve ark., 2021; Gepts, 2023).

Fenotipik kriterlerin tarladaki uygulanabilirliğinin ve doğruluğunun artırılması için teknolojik altyapı kritik bir role sahiptir. Yüksek kapasiteli fenotipleme (HTP) sistemleri, uzaktan algılama ve sensör tabanlı ölçümler ile çok ortamlı ve çok zamanlı veri toplama kapasitesi, daha güvenilir fenotipik kriterler oluşturmayı sağlamaktadır (Dias, 2015; Turner et al., 2019; Gerullis ve ark., 2023). Bu teknolojik entegrasyon, ıslah programlarının karar süreçlerini hızlandırmakta ve genetik ilerleme için gereken

seleksiyon sürelerini (breeding cycle) kayda değer ölçüde kısaltabilmektedir (Fugerey-Scarbel ve ark., 2021).

Fenotipik Kriterlerin Pratikteki Kullanımı ve Sınırlılıkları

Fenotipik ölçümlerin her zaman mutlak bir güvenilirliğe sahip olmadığı açık bir gerçektir; çevresel dalgalanmalar, agronomik yönetim uygulamaları ve hasat zamanı gibi kontrol dışı değişkenler fenotipik verilerin netliğini gölgeleyebilir. Bu nedenle fenotipik veriler, GE (genotip x çevre) etkileşimini doğrudan hesaplamaya dahil eden çok ortamlı varyans analizleri ve stabilite modelleri ile desteklenmelidir (Abou-Khater ve ark., 2022; Balech ve ark., 2023; Crosta ve ark., 2023).

Yüksek verim ve kalite hedeflerine ulaşmada fenotipik veriler tek başına yetersiz kaldığında, genomik bilgilerle entegrasyon (genomik seçim) daha hızlı bir genetik ilerleme sağlar ve özellikle çok sayıda poligenik trait'in eş zamanlı seçimi için büyük avantaj sunar (Fugerey-Scarbel ve ark., 2021; Crosta ve ark., 2023). Ancak genomik yaklaşımlar hiçbir zaman saha tabanlı fenotipik verilerin yerini tamamen almaz; her iki veri kaynağı modelleme süreçlerinde bir arada kullanıldığında en yüksek tahmin doğruluğuna (prediction accuracy) ulaşılır (Fugerey-Scarbel ve ark., 2021).

Geliştirilen bir ıslah hattının üstün agronomik ve moleküler özellikler taşıması, onun ticari bir değer kazanması için tek başına yeterli değildir. Resmi tescil kuruluşları (UPOV ve Türkiye'de TTSM) tarafından yürütülen süreçlerde, aday çeşitlerin uluslararası FYD (Farklılık, Yeknasaklık, Durulmuşluk) testlerini başarıyla geçmesi yasal bir zorunluluktur (UPOV, 2010):

Farklılık (Distinctness): Islah edilen yeni hattın, piyasadaki mevcut tescilli çeşitlerden en az bir morfolojik veya karakteristik özelliği ile net bir şekilde ayrılması gerekir. **Yeknesaklık (Uniformity):** Çeşidi oluşturan popülasyon içindeki bireysel bitkilerin, morfolojik varyasyon göstermeksizin kendi içinde homojen bir yapı sergilemesi şarttır. **Durulmuşluk (Stability):** Çeşidin kendine has ayırt edici ve karakteristik morfolojik özelliklerinin, ardışık generasyonlar ve çoğaltım nesilleri boyunca değişmeden sabit kalması gerekir.

SONUÇ

Bitki ıslahının amaçları; tek boyutlu yaklaşımların ötesinde verim, kalite, adaptasyon, biyotik/abiyotik stres toleransı ve sürdürülebilirliği kapsayan sistematik bir çerçeve içinde ele alınmalıdır. Fenotipik kriterler ıslah programlarında temel referans noktası ve nihai doğrulama aracı olarak kritik rol oynamaya devam etmektedir; ancak bu kriterler, GE etkileşimini ve iklimsel varyasyonları dikkate alan çoklu trait ve çok ortamlı analizlerle desteklendiğinde gerçekçi sonuçlar vermektedir. Genomik seçim ve yüksek kapasiteli fenotipleme (HTP) gibi modern teknolojilerin klasik ıslah hatlarına entegre edilmesi, günümüz ıslah programlarının doğruluğunu ve seleksiyon hızını artırırken, sürdürülebilir tarımsal üretimin de en büyük güvencesini oluşturmaktadır.

Kaynaklar

- Afzal, I., Haq, M. Z. U., Ahmed, S., Hirich, A., & Bazile, D. (2023). Challenges and Perspectives for Integrating Quinoa into the Agri-Food System. *Plants*, 12(19), 3361. <https://doi.org/10.3390/plants12193361>
- Anders, S., Cowling, W. A., Pareek, A., Gupta, K. J., Singla-Pareek, S. L., & Foyer, C. H. (2021). Gaining Acceptance of Novel Plant Breeding Technologies. *Trends in Plant Science*, 26(6), 575–587. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2021.03.004>
- Christinck, A., & Weltzien, E. (2013). Plant breeding for nutrition-sensitive agriculture: an appraisal of developments in plant breeding. *Food Security*, 5(5), 693–707. <https://doi.org/10.1007/s12571-013-0288-2>
- Dias, J. S. (2015a). Biodiversity and Plant Breeding as Tools for Harmony Between Modern Agriculture Production and the Environment. <https://doi.org/10.5772/60080>
- Dias, J. S. (2015b). Plant Breeding for Harmony between Modern Agriculture Production and the Environment. *Agricultural Sciences*, 06(01), 87–116. <https://doi.org/10.4236/as.2015.61008>
- Fugerey-Scarbel, A., Bastien, C., Dupont-Nivet, M., & Lemarié, S. (2021). Why and How to Switch to Genomic Selection: Lessons From Plant and Animal Breeding Experience. *Frontiers in Genetics*, 12. <https://doi.org/10.3389/fgene.2021.629737>
- Gepts, P. (2023). Biocultural diversity and crop improvement. *Emerging Topics in Life Sciences*, 7(2), 151–196. <https://doi.org/10.1042/etls20230067>
- Gerullis, M. K., Pieruschka, R., Fahrner, S., Hartl, L., Schurr, U., & Heckeley, T. (2023). From genes to policy: mission-oriented governance of plant-breeding research and technologies. *Frontiers in Plant Science*, 14. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1235175>
- Muntean, L. S., Ona, A., BERINDEAN, I. V., RACZ, I., & Muntean, S. (2022). Maize Breeding: From Domestication to Genomic Tools. *Agronomy*, 12(10), 2365. <https://doi.org/10.3390/agronomy12102365>
- Rognli, O. A., Pecetti, L., Kovi, M. R., & Annicchiarico, P. (2021). Grass and legume breeding matching the future needs of European grassland farming. *Grass and Forage Science*, 76(2), 175–185. <https://doi.org/10.1111/gfs.12535>
- Turner, S., Mabry, M. E., Beissinger, T., Ross-Ibarra, J., & Pires, J. C. (2019). Evolutionary insights into plant breeding. <https://doi.org/10.31220/osf.io/akdt8>
- Anders, S., Cowling, W. A., Pareek, A., Gupta, K. J., Singla-Pareek, S. L., & Foyer, C. H. (2021). Gaining Acceptance of Novel Plant Breeding Technologies. *Trends in Plant Science*, 26(6), 575–587. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2021.03.004>

NETWORK COMMUNICATION PROTOCOLS COMPARISON AND USAGE DETERMINATION

System Engineering Specialist Berkant Ahmet

Tofaş R&D E&E berkant.ahmet@tofas.com.tr

Vehicle Electronic Architecture Specialist Sıla Bozen Taşçı

Tofaş R&D E&E sila.bozen@tofas.com.tr

Abstract

With the developments in the automotive industry, vehicles are now equipped with an increasing number of sensors and ECUs. The architecture has evolved into a more complex structure that requires significantly better management. With the addition of new components, communication networks have reached critical levels of traffic density. Fast and reliable communication among various systems such as powertrain, ADAS, and infotainment has become one of the fundamental requirements. At this point, the selection of in-vehicle communication protocols is not only related to data transmission speed or bandwidth, but is also closely associated with factors such as security, fault tolerance, cost, network topology, and future scalability. Traditional protocols such as CAN (Controller Area Network) and LIN (Local Interconnect Network) have been widely used for many years in areas such as body electronics and powertrain systems. However, with the emergence of data-intensive systems such as ADAS (Advanced Driver Assistance Systems), autonomous driving, and high-resolution multimedia applications, protocols such as CAN-FD, FlexRay, and Automotive Ethernet, which provide high bandwidth and deterministic communication, have become necessary.

In this paper, the criteria for selecting in-vehicle communication protocols will be evaluated in detail, focusing on factors such as data rate, fault tolerance, functional safety (ISO 26262 compliance), network topology, and cost, along with a comparison of the protocols and their roles in hybrid network architectures.

Keywords: Vehicle network, CAN, Ethernet, CANFD, Flexray, LIN

Introduction

In-vehicle communication protocols are the communication languages that enable data exchange between the Electronic Control Units (ECUs) within a vehicle. Each protocol has different data transfer capacities and speed characteristics in terms of cost, reliability and intended use. Among the common in-vehicle communication protocols, the CAN (Controller Area Network) protocol is widely preferred in powertrain systems due to its strong error management and real-time data transmission capabilities, while LIN (Local Interconnect Network) is used in body electronics and for collecting and processing data from sensors, thanks to its lower cost. With the development of ADAS (Advanced Driver

Assistance Systems), and the widespread use of data-intensive applications such as autonomous driving, high-resolution camera systems, and infotainment, traditional protocols have become insufficient. Therefore, protocols such as CAN-FD, FlexRay, and Automotive Ethernet, which offer higher bandwidth and lower latency, have come to the forefront. The selection of a protocol is determined by factors such as ISO 26262 functional safety requirements, wiring complexity, and system cost.

1. Selection Criteria for In-Vehicle Communication Protocols

The choice of in-vehicle communication protocols is a critical design decision in modern automotive electronic architectures. It directly affects the vehicle's performance, functional safety, scalability and cost. With the growing number of Electronic Control Units (ECUs) and sensors, as well as the increasing demand for real-time and data-intensive applications, protocol selection must be carefully aligned with system requirements.

1.1 Data Rate and Bandwidth Requirements

Each in-vehicle communication protocol has different data rates and bandwidth capacities. For applications requiring low data rates (1–20 kbit/s), the LIN protocol is preferred due to its low-cost structure, particularly for sensor communications. Medium-speed communication (125 kbit/s – 1 Mbit/s) typically employs the CAN-Bus protocol, which is preferred for powertrain and engine control applications. In contrast, high-speed data transmission (10 Mbit/s – 1 Gbit/s) is required for advanced driver assistance systems (ADAS), over-the-air (OTA) updates, and autonomous driving, where CAN-FD or Automotive Ethernet is commonly utilized.

1.2 Real-Time Performance and Latency

Safety-critical applications, such as powertrain and braking systems, autonomous systems demand minimal latency. Automotive Ethernet and Flexray can also meet such requirements. FlexRay features time division multiplexing (TDMA) capability. Thanks to this feature, it can divide communication into time slots, providing a deterministic approach. This structure is effective in preventing delays in safety-critical applications.

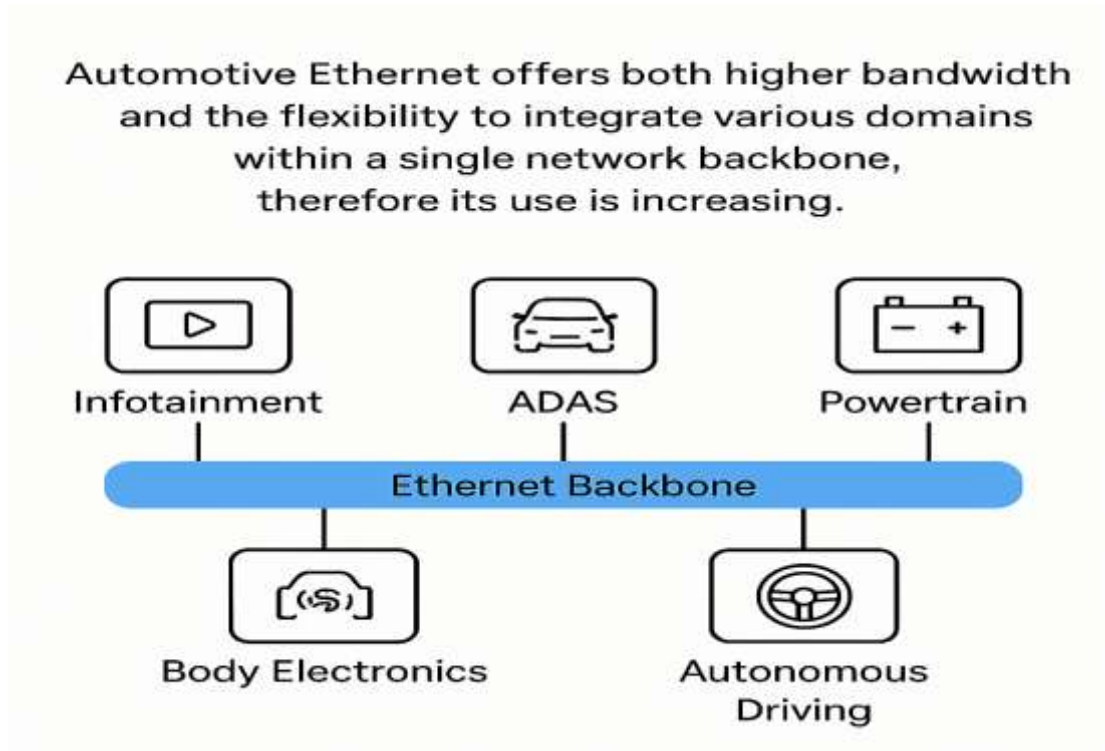
1.3 Safety and Fault Tolerance

It is a parameter that should be taken into consideration when designing all communication networks. Functional safety is a key requirement for automotive networks, especially for ASIL-D (Automotive Safety Integrity Level D) systems defined under the ISO 26262 standard. Protocols such as CAN and FlexRay include robust error detection.

1.4 Network Topology and Modularity

The complexity of the in-vehicle network is another determining factor in protocol selection cause of the speed, management of the systems and other requirements. CAN, FlexRay, and Ethernet support

multi-master topologies, enabling multiple ECUs to communicate across segmented networks. Automotive Ethernet offers both higher bandwidth and the flexibility to integrate various domains within a single network backbone, therefore its use is increasing. For example, in brain architecture, camera images used to detect the surrounding vehicles are transmitted via Ethernet to the zonal control units for processing. Similar examples can also be seen in radar and LiDAR fusion, as well as in autonomous driving decisions with high-speed data transmission.



Picture 1: Ethernet Backbone architecture overview

1.5 Cost and Hardware Complexity

Cost considerations, including cabling, microcontrollers, and transceivers, heavily influence protocol selection. LIN remains the most cost-effective protocol, as it requires minimal hardware and supports simple communication needs. CAN represents a balanced solution between cost and performance, making it the most widely used protocol in current vehicles. FlexRay and Automotive Ethernet, while offering superior performance, involve higher implementation costs due to complex hardware and software requirements, restricting their use to premium or data-intensive applications [6].

1.6 Scalability and Future-Readiness

The rapid evolution of autonomous driving, vehicle-to-everything (V2X) communication, and advanced ADAS applications requires communication protocols with future-proof capabilities. Ethernet-based

solutions, such as 100BASE-T1 and 1000BASE-T1, are emerging as the industry standard for next-generation automotive networks [7]. OEMs are increasingly deploying hybrid network architectures that combine traditional CAN-based subsystems with Ethernet to ensure compatibility and gradual migration.

2. In-Vehicle Communication Protocol Selection Process

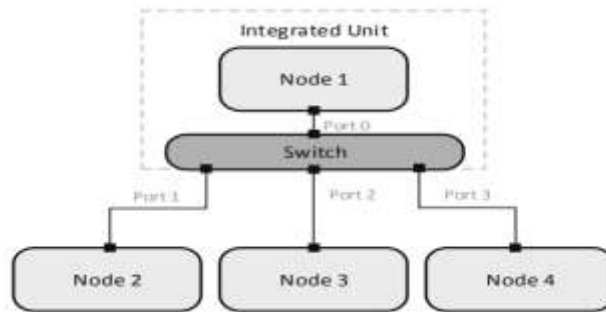
The selection of an in-vehicle communication protocol is a multi-stage engineering process that requires the optimal evaluation of system requirements, performance constraints, and cost factors. An improperly designed process may lead to reduced system performance, unnecessary costs, message transmission delays, and similar adverse outcomes.

2.1 Requirement Analysis

The process of selecting the appropriate protocols begins with a detailed analysis of the system requirements. At this stage, the types of data to be transmitted, their sizes, frequencies, tolerances, and message criticality are determined. For example, the control of powertrain components and airbag systems requires real-time and high-speed communication, whereas infotainment systems, while demanding high bandwidth, are not as time critical as airbag systems. Additionally, busload analysis is performed to assess the network load under various operating conditions. Busload analysis is important for identifying potential network problems and for monitoring load rates in network communications.

2.2 Network Topology Design

Based on the identified requirements and conducted analyses, an appropriate network topology is designed. In this stage, the number of ECUs, their interconnections, communication paths and the boundaries of communication domains are defined. For example, determining the position of the security gateway, organizing sub-networks and configuring different communication areas are carried out in this phase.



Picture 2: Star Topology Ethernet Application

2.3 Timing and Latency Evaluation

This stage involves the evaluation of message transmission times and latency. For protocols such as CAN, bit timing calculations are performed, while for time-triggered systems such as FlexRay, scheduling plans are developed.

2.4 Functional Safety Assessment

Compliance with the safety requirements defined by the ISO 26262 standard plays a significant role. Systems with high ASIL (Automotive Safety Integrity Level) classifications perform safety-critical functions and must be capable of maintaining safe operation even in the presence of a single point of failure. Therefore, it is essential to employ communication protocols that provide fault tolerance and advanced error management mechanisms.

2.5 Cost and Wiring Optimization

The selected protocol must meet performance requirements while also being cost-effective. At this stage, wiring complexity, connector costs, and transceiver prices are analyzed.

2.6 Prototyping and Validation

Following all these stages, the defined network architecture is validated. HIL (Hardware-in-the-Loop) tests and network performance analysis tools are used to evaluate the selected protocol in terms of performance, safety, and cost under real-world operating conditions.

3. Applications in Network Protocol Selections

In this paper, Selection Criteria for In-Vehicle Communication Protocols and Process has been given detailly in section 1 and 2. As a result of this analysis, Table [1] presents a comparison of the protocols based on the parameters of Protocol, Data Rate, Typical Applications, Cable Type, Hardware Complexity, Relative Cable Cost, Relative Hardware Cost and Total Relative Cost. This table can be used to select correct network protocol selection for each vehicle functional application.

Protocol	Data Rate	Typical Application	Cable Type	Hardware Complexity	Relative Cable Cost*	Relative Hardware Cost*	Total Relative Cost*
LIN	1–20 kbit/s	Sensors, actuators, body electronics	Single wire twisted pair	Very Low	1	1	1
CAN	50 kbit/s – 1 Mbit/s	Powertrain, chassis control	Twisted pair	Low-Medium	2	2	2
CAN-FD	2–8 Mbit/s (effective)	ADAS submodules, faster data transfer	High-quality twisted pair	Medium	2	3	3
FlexRay	10 Mbit/s	Chassis, autonomous driving, safety-critical systems	Dual channel twisted pair	High	3	4	4
MOST	25–150 Mbit/s	Multimedia, infotainment	Optical fiber or special copper	Medium-High	4	3	4
Automotive Ethernet (100BASE-T1)	100 Mbit/s	ADAS, camera systems, OTA updates	Single pair twisted cable	High	3	4	4
Automotive Ethernet (1000BASE-T1)	1 Gbit/s	Autonomous driving, high-resolution sensors	High-grade single pair twisted cable	Very High	4	5	5

- Table [1] -

* Relative cost scale:

1 = Lowest cost

5 = Highest cost

In safety-critical and high-speed applications such as steering, braking, airbag deployment, and autonomous driving, the selection of the communication network is determined by factors such as deterministic data transmission capability, latency, reliability, and functional safety requirements [11], [12].

In such systems, messages must reach their target units with minimal delay and predictable timing. For example, even millisecond-level delays in brake or steering commands can directly compromise vehicle safety [13]. Therefore, protocols such as FlexRay, which feature time-triggered operation and dual-channel architecture with high fault tolerance, are frequently preferred [14]. Similarly, CAN and fault-tolerant CAN implementations ensure reliable data transfer through robust error detection, fault isolation, and automatic retransmission mechanisms [15].

In autonomous driving systems, where sensor data (LiDAR, radar, camera) must be processed at high bandwidth with deterministic and low-latency communication, high-speed networking technologies such as Automotive Ethernet are utilized, often enhanced with TSN (Time-Sensitive Networking) standards [16], [17]. Protocol selection also considers factors such as ASIL level, busload analysis, timing analysis, and ISO 26262 compliance [18]. In systems such as electric window controls, mirror folding mechanisms, seat-integrated massage motors, and small LED control units, the use of the LIN bus comes to the forefront since high bandwidth is not required. It provides low cost and, with its simple structure, allows system design without the need for complex topologies. At the same time, it can be easily integrated with the CAN protocol. When we examine the infotainment system, we encounter features that require high bandwidth, such as high-resolution video, navigation maps, and camera images. Here, Automotive Ethernet is used, as well as MOST (Media Oriented Systems Transport) communication. Compared to the new generation Ethernet, it is less flexible and may require additional control units; however, in general, providing high bandwidth of up to 150 Mbps and having low latency makes it a preferred choice.

Conclusion

In today's vehicles, managing the changes in systems driven by various factors and handling the addition of new functions has become increasingly complex. Reducing and properly managing this complexity is critically important to prevent potential issues and delays in vehicle systems. To avoid such problems, selecting the right network protocol is essential. CAN stands out for its reliability and low cost and is commonly used in systems requiring lower bandwidth. However, with evolving and advancing systems, CAN and LIN can no longer meet the expected high bandwidth and low latency requirements. In contrast, Automotive Ethernet not only provides these capabilities but also offers the advantage of integrating different domains within

a single network backbone. With the transition to brain architecture in modern vehicles, Ethernet has emerged as the backbone protocol for these reasons. Furthermore, with the advancement of autonomous driving, V2X (Vehicle-to-Everything) communication, and high-resolution sensor systems, the use of Ethernet is expected to become even more widespread. Nevertheless, CAN and LIN will continue to maintain their importance in low-cost systems that require lower bandwidth.

References

- [1] ISO 17987:2016, *Road vehicles — Local Interconnect Network (LIN)*.
- [2] ISO 11898-1:2015, *Road vehicles — Controller area network (CAN) — Part 1: Data link layer and physical signalling*.
- [3] IEEE Std 802.3bw-2015, *100BASE-T1 Ethernet Specification*.
- [4] FlexRay Consortium, *FlexRay Communications System Protocol Specification, Version 3.0.1*.
- [5] ISO 26262:2018, *Road vehicles — Functional safety*.
- [6] H. Kopetz, *Real-Time Systems: Design Principles for Distributed Embedded Applications*, Springer, 2011.
- [7] M. Di Natale, A. Ferrari, G. Lipari, and L. Mangeruca, *Understanding and Using the Controller Area Network Communication Protocol*, Springer, 2012.
- [8] R. Bosch GmbH, *CAN Specification Version 2.0*, 1991.
- [9] ISO 11898-1:2015, *Road vehicles – Controller area network (CAN) – Part 1: Data link layer and physical signalling*.
- [10] IEEE Std 802.3bw-2015, *100BASE-T1 Ethernet Specification*.
- [11] ISO 26262:2018, *Road vehicles — Functional safety*.
- [12] AUTOSAR, *Specification of Communication, Ver. 4.3.1*, Nov. 2016.
- [13] H. Kopetz, *Real-Time Systems: Design Principles for Distributed Embedded Applications*, Springer, 2011.
- [14] FlexRay Consortium, *FlexRay Communications System Protocol Specification, Version 3.0.1*, 2010.
- [15] ISO 11898-1:2015, *Road vehicles — Controller area network (CAN) — Part 1: Data link layer and physical signalling*.
- [16] IEEE Std 802.3bw-2015, *100BASE-T1 Ethernet Specification*.
- [17] IEEE 802.1 Time-Sensitive Networking Task Group, *TSN Standards Overview*, 2020.
- [18] ISO 17458-1:2013, *Road vehicles — FlexRay communications system*.

Improve Validation Process with Customer Connectivity Data

Cansu Hidayet KELEBEK¹

¹E-mail: cansu.hidayetkelebek@tofas.com.tr; TOFAS R&D Center, Turkish Automobile Factory,
Bursa/Türkiye, ORCID: 0000-0003-3985-4663

Abstract

Due to wide range of constantly-evolving capabilities, automotive Original Equipment Manufacturers(OEMs) face many challenges in trying to test and validate the systems effectively. Moreover, competition in sector forces agile development, demands faster time to market, and pressures to reduce R&D costs.

This study will focus on transformation of the traditional cycle into a data driven feedback cycle to improve validation process. By using real customer connected data in the field, the project targets three goals: Optimize test coverage , reduce effort, Provide feedback to improve validation and design norms. There are many questions that customer data can help to improve validation process. Some examples are; How is the usage behavior of component during lifecycle?, How many km has the component functioned before failure in average?, What are the average conditions before failure?, Did the errors occur because of environment conditions, heavy rain, snow, etc. The aim of this study to use big data analysis for test planning, defect detection and Key Performance Indicator(KPI) determination for validation of a system. With creating data patterns like real system usage (average/boundary), anomaly, failure, etc. target is to narrow and focus test coverage to more effective area.

The study covers the development and evaluation of four use cases; Battery, BSR (Buzz, Squeak, and Rattle), Door Usage, and ECU(Electronic Control Units) DTCs (Diagnostic Trouble Codes) using data collected from over 23,000 vehicles over a 1.5-year period.

Keywords: Connected Vehicles, Vehicle Diagnostic, Customer Connected Data, Power BI Synapse, Validation Process

INTRODUCTION

Because of the quickly increasing complexity of electronic control systems in contemporary vehicles, testing and verifying components are becoming more and more vital. In the automotive industry, the demand for verification of the electronic system will never come to an end in the development phase even when the vehicle is sold. To a certain extent, this issue can be addressed by utilizing virtual product development methods and simulations; however, gathering measurement data from actual components and systems operating in authentic conditions will always be necessary. OEMs performing diagnostic tests, vehicle function test, End to End (E2E) test and Software-In-the-Loop (SIL) /Hardware-In-the-Loop (HIL) test on the vehicle during the vehicle development so as to early failure detection, validate the electronic system. Although model based validation (SIL/HIL) has a huge impact on verification and testing, simulation the real environment, OEMs need to real customer experience/data for optimizing validation process and early detection of issues. Moreover, using real customer data allows OEMs to define real usage of customer, common conditions of anomalies, external impacts on the vehicle and ECUs to be input their validation and design norms.

There are several studies addressing techniques that utilize On-Board Diagnostics II (OBD-II) data, connected vehicle systems, and machine learning methods to improve vehicle diagnostics, driver behavior analysis, and predictive maintenance through telematics and connected data systems. The methodology of this study aligns with findings demonstrating that OBD-II-based telematics integrated with cloud processing can enable real-time driver behavior analysis and fault prediction through a Complex Event Processing (CEP) architecture (Amarasinghe et al., 2015). Similarly, connected vehicle data have been shown to provide valuable insights into real-world vehicle usage, thereby supporting feature optimization, fault identification, and predictive maintenance applications (Cardoso et al., 2024).

An earlier study proposed a wireless vehicle diagnostics framework combining embedded data collection systems with statistical analysis tools to facilitate remote fault detection and accelerate development feedback processes (Johanson and Karlsson, 2007). Their approach significantly contributed to the foundations of modern connected diagnostics by integrating real-time data transmission with automated failure analysis techniques. Furthermore, anomaly detection-based diagnostics methods capable of learning normal sensor behavior across vehicle fleets have enabled early fault detection and more efficient software update targeting (Svensson et al., 2009). This approach improved remote diagnostics by reducing manual intervention while increasing detection accuracy.

Previous research has also investigated efficient feature selection methods in connected vehicle datasets. Correlation-based data reduction (CoDR) techniques have been proposed to effectively compress high-dimensional in-vehicle sensor datasets without substantially compromising diagnostic accuracy (Junho Park et al., 2020). Incorporating a similar approach may improve parameter-Diagnostic Trouble Code (DTC) correlation analysis. In addition, hybrid machine learning models integrating OBD-II and connected vehicle data have been explored to support early fault detection and driver behavior analytics, thereby enhancing vehicle reliability and safety (Zhang et al., 2023). Complementing this work, deep learning frameworks utilizing real-time connected vehicle sensor data for anomaly detection and predictive maintenance have demonstrated improved accuracy in vehicle health monitoring (Lee et al., 2024).

Moreover, data fusion techniques combining OBD-II and Global Positioning System (GPS) data have been examined to improve diagnostic precision and driver safety assessments (Patel et al., 2023). Given the increasing volume and sensitivity of connected vehicle data, privacy-preserving machine learning approaches have become increasingly important. Several methods for protecting user data during diagnostic and predictive maintenance processes while maintaining model performance have been reviewed (Martinez et al., 2024). Similarly, correlation-based feature selection and data reduction methods have been investigated for efficiently handling high-dimensional sensor datasets in connected vehicle fleets, thereby optimizing fault prediction performance without increasing computational complexity (Garcia et al., 2023).

This study utilizes customer connectivity data to provide feedback and derive lessons learned that support design improvements and validation efforts. The project defines four specific use cases to guide data analysis and application development.

Key steps undertaken include:

- Initiation of connectivity data preparation, focusing on transforming unstructured data into structured formats suitable for analysis.
- Integration of external environmental data, specifically ambient temperature, sourced from a reliable third-party database.
- Enhancement of the Power BI SYNAPSE interface to enable effective visualization and data interrogation.
- Development of data flow architectures to facilitate seamless processing and transfer of historical operational data.
- Migration and consolidation of 1.5 years' worth of data from 23,401 vehicles, establishing a robust dataset for subsequent validation studies.

These methodological steps establish a foundation for leveraging real-world data to optimize vehicle design and validation processes.

MATERIALS & METHODS

This study utilized vehicle connectivity data collected from telematic control units (TCUs) installed in passenger vehicles. The TCU served as the primary data acquisition device, transmitting vehicle and environmental information to a central server. Four use cases were defined; battery performance, BSR issues, door usage, and ECU DTCs, each associated with specific parameters for analysis.

Data were obtained from approximately 25,000–35,000 vehicles per day, generating 60–80 GB of raw, unstructured information, which was further enriched with external meteorological data. A big data architecture was employed, where raw data were stored in a data lake, transformed into structured datasets, and processed through ETL pipelines, Spark notebooks, and feature engineering. The resulting structured information was organized into data marts to support scenario-based analyses.

Finally, Microsoft Power BI was used as the visualization layer, enabling the creation of dynamic dashboards to interpret and validate the findings.

The overall workflow of data collection, storage, and analysis is illustrated in Figure 1.

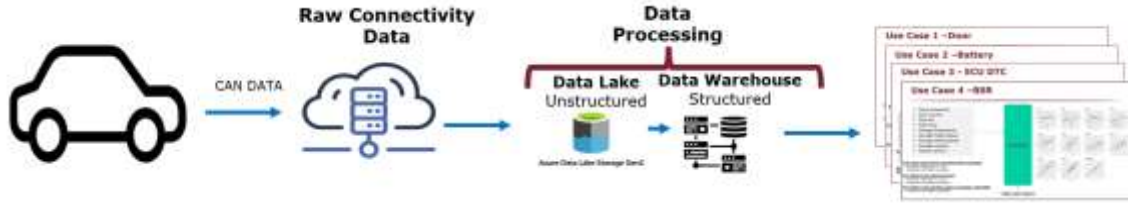


Figure 1. Workflow of data collection, storage, and analysis for scenario-based validation.

1. Use Case Definition

Telematic Control Unit is an ECU in the automotive industry to connect the vehicle to the server via cellular network. This device collects vehicle data from CAN bus and environmental information from peripherals (Sensors, GNSS etc.) then processes bulk data and sends mined data to a defined server.

The device is powered by 9V to 16V power connected to the vehicle battery via OBD. An internal 4G Cellular Modem is used to provide bidirectional wireless data transfer between TCU and a Service Provider. The LTE modem supports the TD-LTE and the FDD-LTE LTE standard, according to regional band requirements including GSM/GPRS/EDGE.

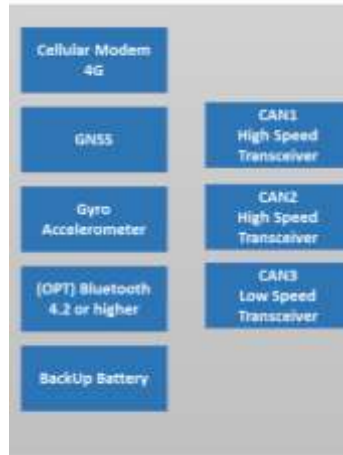


Figure 2. Block Diagram of TCU

2. Use Case Definition

Four use cases have been defined in the scope of this study which are Battery Issues, BSR(Buzz, Squeak & Rattle Noise) Issues, Door and ECU DTC respectively as can be seen in Table 1.

Table 1. *Use Case Definition and Parameters*

Use Case	Definition	Parameters
Battery	-Define VINs with Battery WC failure -Define VINs with Battery Anomalies (Potential Failures) -Define relation of them with related parameters	-Total Ignition Cycle -Total Km -Total Time -Total Time (IGN ON ENG ON) -Average Battery SOC (IGN ON ENG OFF) -Average Battery Voltage (IGN ON ENG OFF) -Average Temperature -Average Location
BSR	-Define VINs with BSR claim -Define relation of BSR with related parameters	-Harsh movement (Acceleration/Deceleration/Turn) -Door Counter -Average Location -Average Temperature -Impact Confirm -Average Engine Speed -Average Vehicle Speed -Total Time -Total Km
Door	-Define statistical usage of Doors	-FL Door Counter Average -FR Door Counter Average -RL Door Counter Average -RR Door Counter Average -Trunk Door Counter Average
ECU DTC	-Define most common DTCs for all ECUs -Define relation of DTCs with related parameters	-Total Ignition Cycle -Total Km -Total Time -Average Temperature -Average Engine Speed -Average Vehicle Speed -Average Location -Average Battery SOC (IGN ON ENG OFF) -Average Battery Voltage (IGN ON ENG OFF) -HarshMovement(Acceleration/Deceleration)

3. Data Processing

3.1. Data Infrastructure

A big data architecture was employed to manage the complexity and scale of the information flow , as illustrated in Figure 3. Unstructured raw data was stored in a data lake, while processed and standardized data were migrated into a data warehouse to facilitate accessibility and analysis. During

this process, 18 new structured tables were generated to ensure that the data were easily queryable and analyzable.

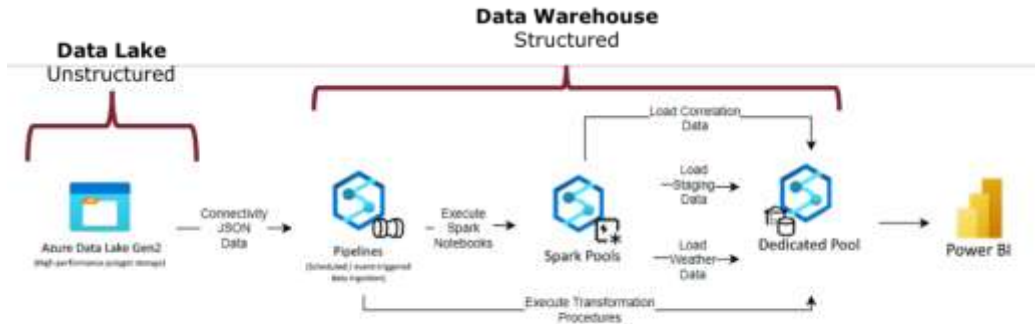


Figure 3. Big Data Architecture

3.2 Data Preparation and Structuring

Several steps were undertaken to prepare the data for analytical use:

- Data discovery and dictionary validation were performed to evaluate attribute definitions and ensure semantic consistency.
- As shown in Figure 4, transformation to a structured format was conducted, during which raw vehicle and weather data were organized at the asset identifier level. This process yielded 53 additional engineered features.



Figure 4. Transition to Structured Data on Azure

- Feature engineering was applied, where scenario-based correlations were examined to derive attributes relevant for subsequent analyses (Figure 5).



Figure 5. Feature Engineering on Azure

RESULTS

1. Use Case 1-Battery Output

Data from 23,401 vehicles were analyzed to investigate the operational and environmental factors affecting battery performance. Correlation analyses were performed with respect to both occurrence and anomaly detection metrics. The highest correlations with warranty claims were observed for average temperature ($r = 0.12$), ignition off count ($r = 0.09$), ignition cycle count ($r = 0.09$), ignition on count ($r = 0.08$), and ignition cycle time ($r = 0.08$). Additional contributing factors included key-on engine off time ($r = 0.04$), exposure to temperatures under 10°C ($r = 0.03$), anomaly voltage count ($r = 0.03$), and duration under 0°C ($r = 0.02$). Similar patterns were identified in the anomaly-based correlation analysis, where average temperature ($r = 0.12$), ignition off count ($r = 0.10$), and ignition cycle count ($r = 0.09$) exhibited the strongest associations with detected anomalies. These results indicate that low ambient temperature conditions, high ignition cycling frequency, and electrical voltage irregularities significantly increase the likelihood of battery-related failures. The findings suggest that preventive maintenance measures should be prioritized for vehicles operating in cold climate zones and for those exhibiting frequent ignition cycling patterns. Additionally, anomaly voltage detection could serve as an early warning indicator for impending battery issues.

Table 2. *Correlations with Warranty Claims*

Feature	Correlation(r)
Average Temperature	0.12
Ignition Off Count	0.10
Ignition Cycle Count	0.09
Ignition On Count	0.09
Ignition Cycle Time	0.08
Key On – Engine Off Time	0.04
Anomaly Voltage Count	0.03
Under 10°C Duration	0.02
Under 20°C Duration	0.02

Table 3. *Correlations with Anomalies*

Feature	Correlation(r)
Average Temperature	0.12
Ignition Off Count	0.09
Ignition Cycle Count	0.09
Ignition On Count	0.08
Ignition Cycle Time	0.08
Key On – Engine Off Time	0.04
Under 10°C Count	0.03
Anomaly Voltage Count	0.03
Under 0°C Duration	0.02

2. Use Case 2-BSR Output

Operational and usage patterns influencing BSR (Buzz, Squeak, and Rattle) occurrences were investigated through the analysis of data from 23,401 vehicles. Correlation analyses were conducted using a range of vehicle usage and environmental parameters [Table. 4].

The strongest correlations with claims were identified for passenger door count ($r = 0.24$), average temperature ($r = 0.24$), and driver door count ($r = 0.22$). Additional high-impact parameters included harsh deceleration value ($r = 0.19$), harsh acceleration count ($r = 0.18$), total over-speed count ($r = 0.18$), and maximum over-speed count ($r = 0.18$). Driving behavior-related metrics, such as maximum harsh deceleration value ($r = 0.17$), maximum harsh acceleration value ($r = 0.16$), total over-RPM count ($r = 0.15$), and collision-related metrics (max collision value $r = 0.15$, average collision value $r = 0.13$), also showed substantial correlations with claims.

These results suggest that BSR issues are significantly influenced by vehicle access frequency (door usage), ambient temperature variations, aggressive driving patterns (harsh acceleration, deceleration, high-speed turns), and collision incidents. Preventive measures should target high-usage vehicles, drivers with harsh usage profiles, and vehicles operating under extreme temperature conditions.

Table 4. *Correlations with Warranty Claims – BSR*

Feature	Correlation (r)
Passenger Door Count	0.24
Average Temperature	0.24
Driver Door Count	0.22
Harsh Dec Value	0.19
Harsh Acc Count	0.18
Total Over Speed Count	0.18
Max Over Speed Count	0.18
Max Harsh Dec Value	0.17
Max Harsh Acc Value	0.16
Total Over RPM Count	0.15
Max Collision Value	0.15
Harsh Turn Count	0.15
Average Collision Value	0.13
Average Harsh Turn Value	0.13
Average Harsh Dec Value	0.12
Right Rear Door Count	0.11
Left Rear Door Count	0.11
Average Harsh Acc Value	0.11
Average Over Speed Count by Trip	0.11
Max Harsh Turn Value	0.10
Hatch Count	0.09
Max Over RPM Count	0.09
Average Over Speed Count by Total Km	0.06
Average Over RPM Count by Total Km	0.06

3. Use Case 3- Door

This analysis utilized operational data from 23,401 vehicles to calculate annual door usage frequencies. On average, the driver door was used 798 times per year, followed by the passenger door (376 times), the hatch (299 times), and the right rear door (261 times), as shown in Figure 6.

The unexpectedly higher frequency of hatch door operations compared to the right and left rear doors in passenger vehicles.

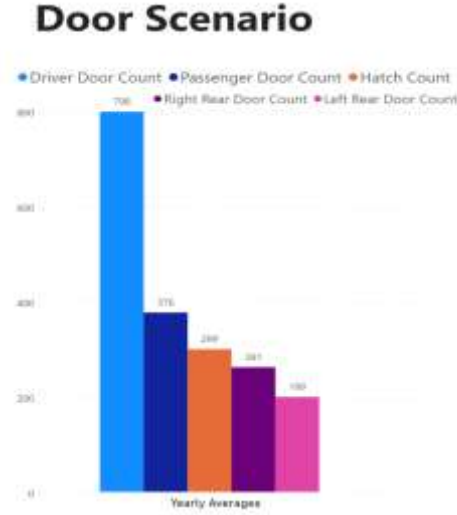


Figure 6. Output of Door Scenario

4. Use Case 4-DTC

An analysis of 23,401 vehicles was conducted to explore the relationship between ECU Diagnostic Trouble Codes (DTCs) and operational parameters using correlation matrices. The study focused on the top five ECUs (CAN Node 1, CAN Node 2, CAN Node 3, CAN Node 4, CAN Node 5) and their 15 most frequent DTCs. A total of 2,399,553 DTCs were recorded, of which 1,662,218 codes (69.3%) originated from the CAN Node 1, 139,665 codes (5.8%) from the CAN Node 3, 151,139 codes (6.3%) from the CAN Node 5, 134,844 codes (5.6%) from the CAN Node 4, and 36,872 codes (1.5%) from the CAN Node 2.

4.1. Network-Based Errors

CAN Node 1 – CAN Node 5 Command Missing Message and CAN Node 1 –CAN Node 4 Signal Invalid showed strong correlation with Ignition Cycle Count, Ignition Cycle Time, and Average Temperature. CAN Node 2 – Mixer Motor Command (Left Side) Circuit Open was highly correlated with Hash Acceleration/Deceleration Counts.

4.2. Component-Based Errors

CAN Node 3 – Invalid Data Received from Body and CAN Node 3 – USB Connection Circuit Above Threshold demonstrated correlation with Hash Turn Counts and Max Turn Value. CAN Node 5 – License Plate Lights Circuit Below Threshold and CAN Node 5 – Fog Light Front Right Circuit Fault showed correlation with Average Battery Voltage and SOC. CAN Node 2 – Mixer Motor Command Circuit Short to Battery was correlated with Max Acceleration Value and Hash Deceleration Counts.

DISCUSSION

A notable observation across all use cases is the consistent role of environmental factors (temperature) and driver behavior (harsh maneuvers, frequent ignition cycles) in influencing component

reliability. This reinforces the importance of integrating real-world data patterns into validation planning, allowing for a more focused test coverage that mirrors true usage conditions.

By combining these insights, the proposed data-driven validation process not only enhances test efficiency but also supports a feedback loop for continuous improvement of design norms. Ultimately, leveraging connected vehicle data enables more predictive, targeted, and cost-effective validation strategies, aligning with OEM goals of faster time-to-market and reduced R&D expenditure.

References

Amarasinghe, A., et al. (2015). Real-time driver behavior analysis and fault prediction using OBD2-based telematics and cloud processing. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*.

Cardoso, R., et al. (2024). Connected vehicle data for feature design optimization and predictive maintenance. *Ford Motor Company Research*.

Garcia, M., et al. (2023). Correlation-based feature selection for vehicle fault prediction in connected fleets. *Computers in Industry*.

Johanson, P., & Karlsson, L. (2007). Wireless vehicle diagnostics combining embedded data collection and statistical analysis. *Vehicle System Development Journal*.

Lee, J., et al. (2024). Deep learning framework for real-time vehicle health monitoring via connected sensors. *Journal of Automotive Engineering*.

Martinez, D., et al. (2024). Privacy-preserving machine learning in connected vehicles: A review. *IEEE Access*.

Park, J., et al. (2020). Correlation-based data reduction for efficient feature selection in connected vehicle datasets. *Journal of Automotive Data Analytics*.

Patel, S., et al. (2023). Data fusion techniques for enhanced vehicle telematics using OBD-II and GPS data. *Sensors*.

Svensson, K., et al. (2009). Anomaly detection-based vehicle diagnostics method for fleet sensor behavior. *International Journal of Vehicle Systems*.

Zhang, Y., et al. (2023). Machine learning approaches for predictive vehicle diagnostics using OBD-II data and telematics. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*.

Çanakkale İli, Ezine İlçesi Biyokütle Enerji Potansiyelinin İncelenmesi Ve Sürdürülebilirlik Açısından Değerlendirilmesi

Mesut ÇETİNKAYA

Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Fakültesi Enerji Kaynakları ve Yönetimi

mstctnky@hotmail.com - <https://orcid.org/0009-0005-5171-928X>

Doc. Dr. Üyesi Gül Ebru Orhun

Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Bayramiç Meslek Yüksekokulu, Park Ve Bahçe Bitkileri, Süs Bitkileri Yetiştiriciliği

ebruorhun@comu.edu.tr - <https://orcid.org/0000-0002-9902-5421>

ÖZET

Çanakkale ili Ezine ilçesinin biyokütle enerji potansiyelinin belirlenmesi ve sürdürülebilirlik açısından değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Araştırmada bitkisel üretim, hayvansal faaliyetler ve orman varlığına dayalı biyokütle kaynakları bütüncül bir yaklaşımla incelenmiştir. Çalışmada kullanılan veriler, ilgili resmi kurumların güncel istatistiklerinden elde edilmiş; biyokütle ve enerji eşdeğerleri literatürde kabul gören katsayılar kullanılarak hesaplanmıştır. Bitkisel biyokütle hesaplamalarına göre ilçede yaklaşık 498.521 ton/yıl kuru biyokütle potansiyeli bulunduğu ve bunun yaklaşık 2.319 MWh/yıl enerjiye karşılık geldiği belirlenmiştir. Hayvansal biyokütle açısından toplam 403.094 baş hayvan varlığına bağlı olarak yıllık yaklaşık 163.810 ton gübre üretildiği; bu miktarın yaklaşık 7,8 milyon m³ biyogaz ve 36.711 MWh/yıl enerji potansiyeli oluşturduğu tespit edilmiştir. Orman varlığına dayalı hesaplamalarda ise ilçede yaklaşık 120.000–135.000 ton/yıl biyokütle potansiyeli bulunduğu ve bunun 558–628 MWh/yıl enerji üretimine karşılık geldiği belirlenmiştir. Elde edilen bulgular, Ezine ilçesinde biyokütle enerji potansiyelinin ağırlıklı olarak hayvansal kaynaklara dayandığını, bitkisel ve orman kaynaklarının ise tamamlayıcı nitelikte olduğunu göstermektedir. Çalışma sonucunda, özellikle biyogaz teknolojilerine dayalı yatırımların bölge için uygun olduğu ve bu yatırımların enerji üretimi, çevresel sürdürülebilirlik ve kırsal kalkınma açısından katkı sağlayabileceği değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Biyokütle enerjisi, biyogaz, yenilenebilir enerji, Ezine, sürdürülebilirlik.

1. GİRİŞ

Enerji talebinin küresel ölçekte giderek artması, fosil yakıt rezervlerinin sınırlı olması ve bu kaynakların çevresel etkilerinin belirginleşmesi, yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelik ilgiyi artırmıştır. Özellikle iklim değişikliğiyle mücadele, karbon emisyonlarının azaltılması ve sürdürülebilir kalkınma hedefleri doğrultusunda yerel, çevre dostu ve yenilenebilir enerji üretim modelleri önem kazanmıştır. Bu bağlamda biyokütle enerjisi hem atıkların değerlendirilmesine olanak sağlaması hem de enerji üretiminde süreklilik sunabilmesi nedeniyle önemli yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olarak değerlendirilmektedir (Bayraç ve Özarslan, 2018).

Biyokütle enerjisi; tarımsal artıklar, hayvansal atıklar, orman ürünleri ve organik atıklar gibi farklı kaynaklardan elde edilebilmektedir. Bu yönüyle biyokütle, enerji üretimi ile atık yönetimini bütünleştiren bir sistem sunmaktadır (Topal ve Arslan, 2008). Ayrıca biyokütle kaynaklarının değerlendirilmesi çevresel sürdürülebilirliğin desteklenmesi, kırsal kalkınmanın güçlendirilmesi ve yerel ekonomik katma değer oluşturulması açısından da önem taşımaktadır. Özellikle tarımsal ve hayvansal üretimin yoğun olduğu bölgelerde biyokütle kaynaklarının enerjiye dönüştürülmesi hem atıkların daha etkin yönetilmesine hem de yerel enerji üretim kapasitesinin artırılmasına katkı sağlamaktadır (Çağal, 2009).

Çanakkale ili Ezine ilçesi; tarımsal üretim kapasitesi, hayvancılık faaliyetleri ve orman varlığı bakımından biyokütle enerji üretimi açısından dikkate değer bir potansiyele sahiptir (Özsayın, 2020). Bununla birlikte mevcut literatürde, Ezine ilçesi özelinde biyokütle kaynaklarının miktarını, enerji üretim potansiyelini ve sürdürülebilirlik boyutunu birlikte ele alan çalışmaların sınırlı olduğu görülmektedir. Bu durum, yerel ölçekte biyokütle potansiyelinin belirlenmesine ve enerji planlamasına katkı sunacak çalışmalara duyulan ihtiyacı artırmaktadır.

Bu çalışmanın amacı, Çanakkale ili Ezine ilçesinde bulunan biyokütle kaynaklarının türlerini ve miktarlarını belirlemek, bu kaynakların enerji üretim potansiyelini nicel olarak ortaya koymak ve elde edilen bulguları sürdürülebilirlik perspektifiyle değerlendirmektir. Bu kapsamda bitkisel üretim, hayvansal faaliyetler ve orman varlığına dayalı biyokütle kaynakları incelenmiş; elde edilen veriler literatürde kabul gören katsayılar aracılığıyla biyokütle ve enerji eşdeğerlerine dönüştürülmüştür.

Araştırmanın kapsamı, Ezine ilçesiyle sınırlandırılmıştır. Çalışmada kullanılan veriler büyük ölçüde TÜİK, Tarım ve Orman Bakanlığı, Çanakkale İl Tarım ve Orman Müdürlüğü ve ilgili yerel kurumsal kaynaklardan elde edilen ikincil verilere dayanmaktadır. Bu nedenle verilerin güncelliği, ayrıntı düzeyi ve kurumlarca yayımlanma biçimi çalışmanın temel sınırlılıkları arasında yer almaktadır. Bununla birlikte, çalışma ilçe düzeyinde biyokütle enerji potansiyelini bütüncül biçimde ele alması bakımından yerel enerji planlaması, atık yönetimi ve sürdürülebilir kalkınma tartışmalarına katkı sunmaktadır.

2. YÖNTEM VE UYGULAMA

Bu çalışma, Çanakkale ili Ezine ilçesinin biyokütle enerji potansiyelini belirlemeye yönelik betimsel ve hesaplama dayalı nicel bir araştırma olarak tasarlanmıştır. Araştırmada bitkisel üretim, hayvansal faaliyetler ve orman varlığına dayalı biyokütle kaynakları ayrı ayrı ele alınmıştır. Çalışmada kullanılan veriler, ilgili resmî kurumların yayımladığı güncel istatistiklerden ve yerel düzeyde elde edilen veri setlerinden derlenmiştir.

Bitkisel biyokütle potansiyelinin belirlenmesinde Ezine ilçesine ait ürün grupları ve ekili alan verileri kullanılmıştır. Ürünler; tahıllar ve endüstri bitkileri, yem bitkileri, meyvecilik ve çok yıllık bitkiler ile sebze ve bahçe bitkileri olarak gruplandırılmıştır. Elde edilen ekili alan verileri hektara çevrilmiş ve bir

hektardan ortalama 27,5 ton kuru biyokütle elde edilebileceği varsayımıyla hesaplama yapılmıştır. Enerji dönüşümünde ortalama ısı değeri 4000 kcal/kg olarak kabul edilmiş; enerji değeri TEP ve MWh cinsinden hesaplanmıştır.

Hayvansal biyokütle potansiyelinin hesaplanmasında büyükbaş, küçükbaş ve kanatlı hayvan varlığı esas alınmıştır. Hayvan gruplarına göre günlük gübre üretim katsayıları kullanılarak yıllık gübre miktarı hesaplanmış, daha sonra bu miktar biyogaz verim katsayılarıyla çarpılarak yıllık biyogaz potansiyeli belirlenmiştir. Elde edilen biyogaz miktarı, 1 m³ biyogazın yaklaşık 4,7 kWh enerji sağlayabileceği kabulüyle enerji eşdeğerine dönüştürülmüştür.

Orman biyokütlesi için ise Türkiye orman dağılımı ve Çanakkale orman dağılımı esas alınarak Ezine ilçesinin tahmini orman varlığı dikkate alınmış ve hektar başına yıllık ortalama kuru biyokütle oluşumu üzerinden hesaplama yapılmıştır. Elde edilen tüm bulgular, biyokütle enerji potansiyeli ve sürdürülebilirlik açısından değerlendirilmiştir.

Araştırmada kullanılan veriler; Ezine ilçesine ait bitkisel üretim alanları, hayvan varlığı ve orman varlığına ilişkin ikincil veri kaynaklarından elde edilmiştir. Bitkisel üretim verileri ürün gruplarına göre, hayvansal veriler ise büyükbaş, küçükbaş ve kanatlı hayvan gruplarına göre sınıflandırılmıştır. Veriler, biyokütle enerji potansiyelinin hesaplanmasına uygun hale getirilerek analiz edilmiştir.

Bitkisel biyokütle hesaplamalarında ekili alan, hektara dönüştürülmüş ve hektar başına ortalama kuru biyokütle miktarı esas alınmıştır. Hayvansal biyokütle hesaplamalarında hayvan sayısı, günlük gübre üretimi, yıllık gübre miktarı, biyogaz verimi ve enerji dönüşüm katsayıları kullanılmıştır. Orman biyokütlesi ise tahmini orman alanı ve hektar başına yıllık biyokütle üretimi üzerinden hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar ton/yıl, m³/yıl, TEP ve MWh/yıl birimleriyle ifade edilmiştir.

3. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Bitkisel biyokütle potansiyeline ilişkin hesaplamalarda, Ezine ilçesinde toplam 181.280,37 dekar ekili alan dikkate alınmıştır. Bu alanın yaklaşık 18.128,037 hektara karşılık geldiği belirlenmiş ve hektar başına ortalama kuru biyokütle üretimi esas alınarak yapılan hesaplamalarda yaklaşık 498.521 ton/yıl kuru biyokütle potansiyeli elde edilmiştir. Bu miktarın enerji karşılığı yaklaşık 199,408 TEP ve 2.319,120 MWh/yıl olarak hesaplanmıştır. Bitkisel üretim grupları içerisinde en yüksek potansiyelin zeytin, arpa, buğday ve mısır üretiminden kaynaklandığı görülmüştür. Özellikle zeytin üretimi, ilçedeki bitkisel biyokütle potansiyelinin temel belirleyicilerinden biri olarak öne çıkmaktadır.

Hayvansal biyokütle potansiyeline ilişkin bulgular incelendiğinde, Ezine ilçesinde toplam 403.094 baş hayvan varlığı bulunduğu belirlenmiştir. Büyükbaş, küçükbaş ve kanatlı hayvan grupları üzerinden yapılan hesaplamalarda yıllık yaklaşık 163.810,48 ton gübre potansiyeli olduğu tespit edilmiştir. Bu gübre miktarından elde edilebilecek biyogaz miktarı yaklaşık 7.811.026 m³/yıl, enerji karşılığı ise yaklaşık 36.711,82 MWh/yıl olarak hesaplanmıştır. Hayvansal biyokütle içerisinde en yüksek katkının küçükbaş hayvancılıktan geldiği, büyükbaş hayvancılığın ise birim hayvan başına gübre üretiminin yüksek olması nedeniyle önemli bir enerji potansiyeli sunduğu belirlenmiştir. Kanatlı hayvan sayısının yüksek olmasına rağmen, birim gübre üretim miktarının düşük olması nedeniyle toplam enerji potansiyeline katkısının daha sınırlı kaldığı görülmüştür.

Orman kaynaklı biyokütle potansiyeli ise Ezine ilçesinin tahmini orman varlığı üzerinden değerlendirilmiştir. İlçede yaklaşık 40.000–45.000 hektar aralığında orman alanı bulunduğu kabul edilerek yapılan hesaplamalarda, yıllık 120.000–135.000 ton kuru orman biyokütlesi potansiyeli olduğu belirlenmiştir. Bu potansiyelin enerji karşılığı yaklaşık 558–628 MWh/yıl aralığında hesaplanmıştır.

Orman biyokütlesi, toplam enerji potansiyeli içerisinde sınırlı bir paya sahip olmakla birlikte, özellikle bakım, budama ve orman artıkları açısından tamamlayıcı bir kaynak niteliği taşımaktadır.

Genel sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde, Ezine ilçesinde biyokütle enerji potansiyelinin ağırlıklı olarak hayvansal kaynaklara dayandığı görülmektedir. Hayvansal biyokütle potansiyeli, bitkisel ve orman kaynaklı biyokütleye kıyasla daha yüksek enerji üretim kapasitesi sunmaktadır. Bu durum, ilçede özellikle biyogaz teknolojilerine dayalı enerji yatırımlarının öncelikli olarak değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

Çalışmadan elde edilen bulgular, biyokütle kaynaklarının yalnızca enerji üretimi açısından değil, aynı zamanda atık yönetimi, çevresel sürdürülebilirlik, kırsal kalkınma ve yerel ekonomik değer yaratma açısından da önemli olduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle hayvansal atıkların biyogaz üretiminde değerlendirilmesi hem çevresel kirliliğin azaltılmasına hem de yerel düzeyde yenilenebilir enerji üretiminin artırılmasına katkı sağlayabilir.

KAYNAKÇA

- Bayraç, H. N., & Özarslan, B. (2018). Biyokütle enerjisi ve ekonomik büyüme arasındaki ilişkinin ampirik bir analizi: Türkiye örneği. *Yalova Sosyal Bilimler Dergisi*, 8(17), 1-17.
- Çağal, F. E. (2009). *Biyokütle enerjisi potansiyelinin Türkiye açısından değerlendirilmesi*.
- Dönmez, A. (2024). *Çanakkale ilinin bitkisel ve hayvansal biyokütle açısından atık miktarı ve potansiyelinin araştırılması*.
- Özsayın, Ö. G. D. D. (2020). Çanakkale ilinde tarımda sürdürülebilirlik ve iyi tarım uygulamaları. *Bilimler Kongresi*, 150.
- T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı. (2025). *Çanakkale tarımsal yatırım rehberi*. Tarım Reformu Genel Müdürlüğü.
- Topal, M., & Arslan, E. I. (2008). Biyokütle enerjisi ve Türkiye. VII. *Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu*, 17, 19.
- Güney Marmara Kalkınma Ajansı (GMKA). (2023). *Çanakkale ili süt ve süt ürünleri tesisi ön fizibilite raporu*. T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı.
- Tarım ve Orman Bakanlığı Tarımsal Araştırmalar ve Politikalar Genel Müdürlüğü (TAGEM). (2022). *Zeytin ve zeytinyağı sektör politika belgesi (2022–2026)*.
- Ulusal Zeytin ve Zeytinyağı Konseyi (UZZK). (2022). *2022–2023 üretim sezonu sofralık zeytin ve zeytinyağı rekoltesi ulusal resmi tespit heyeti raporu*.
- Orman ve Su İşleri Bakanlığı Su Yönetimi Genel Müdürlüğü. (2014). *Kuzey Ege havzası koruma eylem planı*.

BitLocker Şifreleme Anahtarlarının Elde Edilmesinde Kullanılan Yöntemlerin Adli Bilişim Kapsamında Değerlendirilmesi

Evaluation of Methods Used to Obtain BitLocker Encryption Keys within the Scope of Digital Forensics

Derleme Makalesi
Adli Bilişim ve Bilgi Güvenliği

Mehmet SEVİNÇ¹, Ahmet ŞENOL²

¹E-mail: mehmet.sevinc@st.uskudar.edu.tr; Üsküdar Üniversitesi, Fen Bilimleri Fakültesi, Siber Güvenlik Yüksek Lisans Programı, İstanbul / Türkiye.

²E-mail: ahmet.senol@uskudar.edu.tr; Üsküdar Üniversitesi, Fen Bilimleri Fakültesi, Siber Güvenlik Yüksek Lisans Programı Anabilim Dalı Başkanı, İstanbul / Türkiye.

Özet

Tam disk şifreleme, kaybolan, çalınan ya da adli süreç kapsamında el konulan cihazlardaki verileri yetkisiz erişime karşı korumada günümüzde standart bir güvenlik yaklaşımı hâline gelmiştir. Microsoft'un Windows ekosistemiyle sunduğu BitLocker, hem kurumsal hem de bireysel kullanımlarda bu yaklaşımın en yaygın örneklerinden biridir. Bununla birlikte, şifrelemenin sağladığı koruma adli bilişim incelemelerinde çoğu zaman delile erişimi zorlaştıran temel bir engel olarak karşımıza çıkar. Bu makalede BitLocker'ın tarihsel gelişimi, anahtar hiyerarşisi ve kullandığı şifreleme algoritmaları güncel literatür üzerinden ele alınmakta; şifreleme anahtarlarının elde edilmesinde kullanılan donanım, bellek ve yazılım temelli yöntemler karşılaştırmalı olarak değerlendirilmektedir. Çalışmanın merkezinde, 2024 yılında 38. Chaos Communication Congress'te ayrıntılı olarak gösterilen ve CVE-2023-21563 numarasıyla izlenen BitPixie zafiyeti yer almaktadır. Donanıma müdahale gerektirmemesi, düşük maliyeti ve geride kalıcı iz bırakmama olasılığı nedeniyle bu yöntemin adli bilişim açısından önemi ayrıca tartışılmıştır. Sonuç olarak, varsayılan TPM tabanlı BitLocker yapılandırmasının tek başına yeterli güvence sağlamadığı; önyükleme öncesi kimlik doğrulamanın hem savunma hem de adli inceleme süreçlerinde belirleyici rol üstlendiği görülmektedir.

Anahtar Kelimeler: adli bilişim, BitLocker, tam disk şifreleme, BitPixie, CVE-2023-21563, dijital delil, TPM.

Abstract

Full disk encryption has today become a standard security approach for protecting data on lost, stolen, or forensically seized devices against unauthorized access. BitLocker, offered by Microsoft as part of the Windows ecosystem, is one of the most widely used examples of this approach in both enterprise and individual contexts. However, the protection provided by encryption often emerges as a major obstacle that complicates access to evidence in digital forensic examinations. This article examines BitLocker's historical development, key hierarchy, and encryption algorithms in light of current literature, and comparatively evaluates hardware-, memory-, and software-based methods used to obtain encryption keys. At the center of the study is the BitPixie vulnerability, demonstrated

in detail at the 38th Chaos Communication Congress in 2024 and tracked as CVE-2023-21563. Due to its lack of need for hardware intervention, low cost, and potential to leave no persistent traces, the forensic significance of this method is also discussed. In conclusion, it is observed that the default TPM-based BitLocker configuration alone does not provide sufficient assurance, and that pre-boot authentication plays a decisive role in both defensive and forensic examination processes.

Keywords: digital forensics, BitLocker, full-disk encryption, BitPixie, CVE-2023-21563, digital evidence, TPM.

1. GİRİŞ

Dijital cihazlar artık gündelik yaşamın hemen her alanında yer aldığı için, suç soruşturmalarında karşılaşılan delil türleri de önemli ölçüde değişmiştir. Bir dizüstü bilgisayarın sabit disk, bir akıllı telefonun belleği ya da küçük bir taşınabilir depolama aygıtı, kimi zaman soruşturmanın yönünü belirleyen en değerli kaynak hâline gelebilmektedir. Bu nedenle dijital delilin hukuka uygun biçimde elde edilmesi, bütünlüğünün korunması ve gerektiğinde aynı yöntemlerle yeniden incelenebilir olması, adli bilişimi çağdaş ceza adaleti sisteminin vazgeçilmez alanlarından biri hâline getirmiştir (Casey, 2011).

Aynı teknolojik dönüşümün diğer yüzünde ise verinin korunması bulunmaktadır. Kullanıcı mahremiyetini, kurumsal sırları ve hassas bilgileri korumak amacıyla geliştirilen tam disk şifreleme çözümleri, artık işletim sistemlerinin ayrılmaz bir parçası hâline gelmiştir. Microsoft BitLocker, Apple FileVault ve VeraCrypt gibi çözümler bu eğilimin öne çıkan örnekleridir. Bu araçların amacı, cihaz kaybolduğunda veya yetkisiz kişilerin eline geçtiğinde depolanan verinin okunmasını teknik olarak engellemektir. Ancak adli bilişim uzmanı açısından bakıldığında aynı koruma, anahtar olmadan anlamlandırılmayan büyük bir veri yığını anlamına da gelebilir.

Bu durum literatürde çoğu zaman "erişim sorunu" veya "going dark" tartışması içinde ele alınmaktadır. Soruşturma makamları, şifrelenmiş cihazlardaki delile ulaşmak istediklerinde çoğu kez algoritmayı kırmaya değil, anahtarın kendisini bulmaya yönelir. BitLocker özelinde bu arayış; TPM ile işlemci arasındaki haberleşmenin dinlenmesinden bellek kalıntılarının incelenmesine, parola tabanlı denemelerden önyükleme zincirindeki yazılım zafiyetlerinin değerlendirilmesine kadar uzanan geniş bir teknik alanı kapsar. Bu yöntemlerin bazıları gelişmiş donanım bilgisi ve fiziksel müdahale gerektirirken, bazıları yalnızca yazılım araçlarıyla ve kısa süre içinde uygulanabilir.

Son dönemde bu alanda en fazla dikkat çeken gelişmelerden biri, "BitPixie" adıyla bilinen ve CVE-2023-21563 olarak kayıt altına alınan zafiyettir. Thomas Lambertz'in 28 Aralık 2024'te Hamburg'da düzenlenen 38. Chaos Communication Congress'te yaptığı sunumla geniş kitlelere tanıtılan yöntem, güncel ve yamalı bir Windows 11 sisteminde, Secure Boot etkin olmasına rağmen BitLocker korumasının aşılabileceğini göstermiştir (Lambertz, 2024). Sunumda geçen "Screwed without a Screwdriver" ifadesi, yöntemin fiziksel donanım müdahalesi olmadan sonuç verebilmesine gönderme yapmaktadır.

Bu makalenin amacı, BitLocker şifreleme anahtarlarının elde edilmesinde kullanılan başlıca yöntemleri adli bilişim bakış açısıyla değerlendirmektir. Bu amaçla önce adli bilişim kavramı ve süreç modelleri özetlenmekte, ardından BitLocker'ın tarihsel gelişimi, mimarisi ve kullandığı şifreleme yaklaşımları açıklanmaktadır. Çalışmanın ağırlık noktasını ise BitPixie yönteminin mantığı, adli süreçlere etkisi ve alınabilecek önlemler oluşturmaktadır. Teknik açıklamalar kamuya açık literatür ve konferans kaynaklarıyla sınırlı tutulmuş; yöntemi uygulanabilir bir saldırı rehberine dönüştürebilecek ayrıntılı komut veya yapılandırma adımlarına bilinçli olarak yer verilmemiştir.

2. ADLİ BİLİŞİM KAVRAMI VE SÜREÇ MODELLERİ

2.1. Tanım ve Kapsam

Adli bilişim, dijital delillerin bilimsel yöntemlerle tanımlanması, toplanması, korunması, incelenmesi, analiz edilmesi ve raporlanması süreci olarak tanımlanabilir. NIST, bu alanı bilginin bütünlüğünü koruyarak ve sıkı bir delil zinciri sağlayarak verilerin tanımlanması, toplanması, incelenmesi ve analiz edilmesine bilimin uygulanması şeklinde ifade eder (Kent vd., 2006). Bu tanımda iki unsur özellikle önemlidir: delilin bütünlüğü ve delil zincirinin kesintisiz biçimde belgelenmesi. Bir dijital bulgunun mahkemede değer taşıyabilmesi, yalnızca elde edilmesine değil, elde edildiği andan raporlandığı ana kadar değişmediğinin gösterilebilmesine bağlıdır.

Adli bilişimin düşünsel temelinde, klasik kriminalistikten gelen Locard'ın değişim ilkesi yer alır. Bu ilkeye göre her temas bir iz bırakır. Fiziksel olay yerinde bu iz bir lif, parmak izi ya da toz parçası olabilir; dijital ortamda ise aynı düşünce günlük kayıtları, dosya zaman damgaları, bellek artıkları veya sistem olayları üzerinden görünür hâle gelir (Casey, 2011). Dolayısıyla adli bilişim yalnızca veriyi okumakla ilgilenmez; verinin hangi koşullarda oluştuğunu, ne zaman değiştiğini ve inceleme sırasında hangi müdahalelere maruz kaldığını da açıklamaya çalışır.

Bu alanda sık yapılan ayrımlardan biri, uçucu ve kalıcı veri ayrımıdır. RAM gibi uçucu belleklerde tutulan bilgiler sistem kapatıldığında kaybolurken, disk üzerindeki veriler güç kesilse bile varlığını sürdürür. BitLocker bağlamında bu ayrım özellikle önemlidir. Çünkü disk şifreli olsa bile sistem çalışırken ve birim çözülmüş durumdayken gerekli anahtarlar bellekte açık biçimde bulunur. Bu nedenle el konulan bir cihazın açık mı kapalı mı olduğu, adli inceleme stratejisini doğrudan etkileyen kritik bir faktördür.

2.2. Adli Bilişim Süreç Modelleri

Adli bilişim incelemelerinin güvenilir, tekrar edilebilir ve hukuken savunulabilir olması için çeşitli süreç modelleri önerilmiştir. En yaygın başvuru noktalarından biri, NIST SP 800-86 kılavuzunda yer alan dört aşamalı modeldir: toplama, inceleme, analiz ve raporlama. Toplama aşamasında deliller belirlenir, etiketlenir ve bütünlüğü korunarak elde edilir. İnceleme aşamasında ham veriden konuya ilişkin bilgiler çıkarılır. Analiz aşamasında bu bilgiler olayın bağlamıyla ilişkilendirilir. Son aşamada ise bulgular açık, anlaşılır ve gerektiğinde savunulabilir biçimde raporlanır (Kent vd., 2006).

DFRWS modeli ve literatürdeki diğer sistematik çerçeveler, bu temel akışı farklı ayrıntı düzeylerinde ele alır. Modeller arasındaki terminoloji değişse de ortak kaygı aynıdır: delilin elde edildiği koşulların belgelenmesi ve incelemenin bağımsız bir uzman tarafından aynı sonuçlara ulaşılabilecek biçimde yürütülmesi. Şifreleme söz konusu olduğunda bu süreç daha karmaşık hâle gelir. Çünkü delile erişmek için yapılan her teknik müdahale, aynı zamanda delilin durumunu değiştirme riski taşır.

2.3. Tam Disk Şifrelemenin Adli Bilişime Etkisi

Tam disk şifreleme, adli bilişimde uzun süre standart kabul edilen iş akışını ciddi biçimde değiştirmiştir. Klasik yaklaşımda incelemeci sistemi kapatır, diski çıkarır ve yazma korumalı bir düzenekle bit düzeyinde imaj alır. Bu yöntem, delil bütünlüğü açısından güçlüdür; çünkü kaynak diske yazma yapılmasını engeller. Ancak disk şifreliyse, bu yöntem sonucunda elde edilen imaj anahtar olmadan çözülemeyen şifreli veriden ibaret kalır.

Bu nedenle şifreli sistemlerde canlı inceleme yöntemleri daha fazla önem kazanmıştır. Sistem açıkken bellekte anahtar, çözülmüş veri veya oturum bilgileri bulunabilir. Fakat canlı inceleme, doğası gereği sistemin mevcut durumuna dokunur ve yeni izler üretir. Bu da erişim ihtiyacı ile delil bütünlüğünü koruma zorunluluğu arasında hassas bir denge kurulmasını gerektirir. BitLocker anahtarlarını elde etmeye yönelik yöntemlerin adli açıdan değerlendirilmesi de tam olarak bu denge üzerinden yapılmalıdır.

3. BİTLOCKER: TARİHSEL GELİŞİM VE TEKNİK MİMARİ

3.1. Tarihsel Gelişim

BitLocker, Microsoft tarafından 2007 yılında Windows Vista ile birlikte kullanıma sunulmuştur. İlk döneminde yalnızca sistem birimini şifrelemeye odaklanan bu teknoloji, Vista Service Pack 1 sonrasında ek veri birimlerini de kapsayacak biçimde genişletilmiştir (Kornblum, 2009). Vista döneminde BitLocker, AES algoritmasını CBC kipinde ve Microsoft'un geliştirdiği Elephant difüzörüyle birlikte kullanıyordu. Bu tasarımın amacı, sektör temelli disk şifrelemede ortaya çıkabilecek belirli manipülasyon risklerini azaltmaktır (Ferguson, 2006).

BitLocker'in gelişiminde önemli dönüm noktalarından biri, Windows 10'un 1511 sürümüyle birlikte XTS-AES kipi devreye alınmasıdır. Bu değişiklik, disk şifrelemede daha standartlaşmış ve depolama ortamları için özel olarak tasarlanmış bir yaklaşıma geçiş anlamına gelmiştir. Günümüzde Windows 11 sistemlerinde BitLocker ya da Aygıt Şifrelemesi çoğu kullanıcı için oldukça görünmez bir güvenlik katmanı olarak çalışır. Kullanıcı deneyimini zorlaştırmaması önemli bir avantajdır; ancak aynı sürtünmesiz yapı, adli bilişim ve saldırı senaryoları açısından belirli zayıflıkları da beraberinde getirir.

3.2. Anahtar Hiyerarşisi

BitLocker'in güvenliği tek bir anahtara dayanmaz; bunun yerine katmanlı bir anahtar mimarisi kullanılır. Bu yapının pratik amacı, kullanıcı parolası veya koruyucu yöntemi değiştiğinde tüm diskin yeniden şifrelenmesini gereksiz kılmaktır. En alt seviyede, diskteki kullanıcı verisini doğrudan şifreleyen Tam Birim Şifreleme Anahtarı (Full Volume Encryption Key, FVEK) bulunur. Kornblum (2009), BitLocker birim üst verisi içinde bu anahtar yapısının nasıl temsil edildiğini ayrıntılı biçimde açıklamıştır.

FVEK doğrudan açıkta tutulmaz; Birim Anahtarı (Volume Master Key, VMK) ile korunur. VMK ise anahtar koruyucular aracılığıyla güvence altına alınır. Bu koruyucular arasında TPM, TPM ve PIN birleşimi, parola, kurtarma anahtarı ve başlangıç anahtarı içeren USB aygıtları yer alabilir. Böylece kullanıcı bir PIN'i değiştirdiğinde yalnızca VMK'yı koruyan ilgili katman güncellenir; diskteki şifreli verinin tamamının yeniden işlenmesine gerek kalmaz.

Adli bilişim açısından kritik nokta şudur: Diski çözebilmek için tüm kriptografik yapıyı baştan sona kırmak gerekmez. VMK elde edildiğinde FVEK'e, dolayısıyla birimin içeriğine erişmek mümkün hâle gelir. Bu nedenle BitLocker'a yönelik pratik saldırıların büyük kısmı doğrudan VMK'yı hedefler. Anahtar ya bellekten, ya TPM ile sistem arasındaki aktarım sırasında ya da zayıf bir kullanıcı parolası üzerinden elde edilmeye çalışılır.

3.3. TPM, Secure Boot ve Güven Zinciri

BitLocker'ın yaygın kullanılan varsayılan yapılandırması Güvenilir Platform Modülü'ne (Trusted Platform Module, TPM) dayanır. TPM; kriptografik anahtarları korumak, sistemin önyükleme sürecini ölçmek ve bu ölçümlere göre belirli anahtarları serbest bırakmak üzere tasarlanmış güvenlik bileşenidir. Sistem açılırken önyükleme bileşenlerinin durumu Platform Yapılandırma Yazmaçları (PCR) üzerinde ölçülür. Ölçümler beklenen değerlerle uyumluysa TPM, VMK'nın kullanımına izin verir.

Bu mekanizma Secure Boot ile birlikte düşünüldüğünde bir güven zinciri oluşturur. Secure Boot, imzası güvenilir olmayan önyükleme bileşenlerinin çalışmasını engellemeyi hedefler. Böylece saldırganın önyükleyiciyi değiştirerek BitLocker anahtarına ulaşması teorik olarak zorlaştırılır. Ancak bu modelin zayıf noktası, yalnızca TPM'e dayanan varsayılan kullanımda kullanıcıdan önyükleme öncesinde herhangi bir gizli bilgi istenmemesidir. Başka bir ifadeyle, sistemin ölçümleri beklenen değerlerle uyumluysa VMK kullanıcı oturumu açılmadan önce belleğe yüklenebilir. Birçok pratik saldırı da tam olarak bu davranıştan yararlanır.

4. BİTLOCKER'DA KULLANILAN ŞİFRELEME ALGORİTMALARI

4.1. AES-CBC ve Elephant Difüzörü

BitLocker'ın ilk sürümlerinde disk şifreleme, AES algoritmasının CBC kipiyle gerçekleştiriliyordu. CBC doğrudan tüm disk üzerinde değil, sektörler temelinde uygulanmaktaydı. Ferguson (2006), Windows Vista için hazırlanan teknik raporda disk şifrelemenin kendine özgü gereksinimlerine dikkat çekmiş ve bu nedenle CBC kipinin Elephant adlı bir difüzörle desteklendiğini belirtmiştir. Difüzörün amacı, şifreli metinde yapılabilecek küçük değişikliklerin düz metin üzerinde daha geniş ve öngörülemez etkiler oluşturmalarını sağlayarak belirli manipülasyonları güçlendirmektir. Bu yaklaşım dönemi için dikkat çekici olmakla birlikte, standartlaşmamış bir tasarım olması nedeniyle eleştirilmiştir. Kriptografik sistemlerde yalnızca güçlü algoritmalar değil, geniş bağımsız incelemeden geçmiş standart yapıların kullanılması da önemlidir. Microsoft'un ilerleyen sürümlerde XTS-AES'e geçmesi, bu açıdan daha öngörülebilir ve sektörle uyumlu bir tercihe yönelme olarak değerlendirilebilir.

4.2. XTS-AES

Güncel BitLocker sürümlerinde varsayılan şifreleme yaklaşımı XTS-AES'tir. XTS, depolama ortamları için tasarlanan ve IEEE 1619-2007 standardıyla tanımlanan bir disk şifreleme kipidir (IEEE, 2008). Bu kipi önemli özelliği, her veri bloğunun bulunduğu konuma bağlı bir ayar değeriyle işlenmesidir. Böylece aynı düz metin, diskin farklı bölgelerinde aynı şifreli metne dönüşmez; bu da örüntü analizini zorlaştırır.

Microsoft, Windows 10 1511 sürümünden itibaren XTS-AES'i BitLocker içinde kullanmaya başlamıştır (WithSecure Labs, 2020). Uygulamada AES-128-XTS ve AES-256-XTS seçenekleriyle karşılaşılabılır. Eski sistemlerde ise AES-CBC tabanlı birimler görülebilir. Bu nedenle adli inceleme yapan uzmanın yalnızca BitLocker kullanıldığını değil, hangi sürüm ve hangi şifreleme varyantıyla karşı karşıya olduğunu da belirlemesi gerekir.

4.3. Algoritmik Güvenlik ve Anahtar Çıkarımının Anlamı

BitLocker'a yönelik pratik saldırıların çoğu AES'i veya XTS kipini matematiksel olarak kırmaya çalışmaz. AES, uygun anahtar uzunluklarıyla günümüz koşullarında kaba kuvvet saldırılarına karşı pratik olarak dayanıklı kabul edilmektedir. Bu nedenle gerçekçi hedef, şifreleme algoritmasını aşmak değil, anahtarın sistem içinde açıkta bulunduğu anı yakalamaktır.

Bu nokta adli bilişim açısından belirleyicidir. Sistem çalışırken işlemcinin şifreli veriyi okuyabilmesi için anahtara erişmesi gerekir. Dolayısıyla anahtar bir aşamada bellekte veya sistem bileşenleri arasındaki aktarım sürecinde kullanılabilir durumdadır. Donanım dinleme, cold boot veya BitPixie gibi yöntemler, kriptografinin matematiksel gücünden çok bu kaçınılmaz kullanım anına odaklanır. Başka bir ifadeyle sorun çoğu zaman algoritmada değil, anahtar yönetiminin ve sistem yapılandırmasının pratik ayrıntılarından biridir.

5. BİTLOCKER ANAHTARLARININ ELDE EDİLMESİNDE KULLANILAN YÖNTEMLER

BitLocker anahtarlarına ulaşmaya yönelik yöntemler, fiziksel müdahale gereksinimi, uygulama zorluğu, harcanan süre ve delil bütünlüğüne etkileri bakımından birbirinden ayrılır. Bu bölümde başlıca yöntemler üç grupta ele alınmakta, ardından BitPixie'nin bu yöntemler arasındaki konumu değerlendirilmektedir.

5.1. Donanım Temelli Yöntemler: TPM Dinleme ve DMA Saldırıları

Donanım temelli yaklaşımlar içinde en bilinenlerden biri TPM dinleme yöntemidir. Ayrık TPM yongası bulunan sistemlerde TPM ile işlemci arasındaki haberleşme anakart üzerindeki LPC, SPI veya I2C gibi veri yolları üzerinden gerçekleşebilir. Önyüklem sırasında ölçümler doğrulandığında VMK, TPM tarafından serbest bırakılır ve sistem tarafından kullanılmak üzere aktarılır. Bu aktarım belirli koşullarda mantıksal çözümleyici veya FPGA tabanlı donanımlarla izlenebilir (Andzakovic, 2019; WithSecure Labs, 2020).

TPM dinleme, yalnızca TPM'e dayanan yapılandırmalarda etkili sonuçlar verebilse de uygulamada zahmetli bir yöntemdir. Anakart üzerinde fiziksel erişim, doğru hatların belirlenmesi ve kimi zaman lehimleme ya da hassas prob kullanımı gerekir. Ayrıca firmware TPM gibi işlemciye daha sıkı bütünleşmiş çözümlerde ayrı bir veri yolu bulunmadığından bu yaklaşım uygulanamayabilir. DMA saldırıları ise Thunderbolt gibi arabirimler üzerinden belleğe doğrudan erişmeyi hedefler; ancak modern sistemlerde IOMMU ve benzeri korumalar bu saldırı yüzeyini önemli ölçüde daraltmıştır.

5.2. Bellek Temelli Yöntemler: Cold Boot Saldırıları

Bellek temelli yöntemlerin klasik örneği cold boot saldırısıdır. Bu saldırı, DRAM'in güç kesildikten hemen sonra içeriğini bir süre tamamen kaybetmemesi olgusuna dayanır. Halderman ve arkadaşları (2009), düşük sıcaklıklarda bellek kalıntılarının daha uzun süre okunabilir kalabildiğini göstermiştir. Çalışan bir sistem ani biçimde yeniden başlatıldığında veya bellek modüllerine fiziksel olarak müdahale edildiğinde, bellekte bulunan VMK'nın kurtarılması teorik olarak mümkün olabilir. Varsayılan TPM-only BitLocker yapılandırması bu açıdan hassastır; çünkü VMK, kullanıcı oturumu açılmadan önce belleğe yüklenebilir. Bununla birlikte modern donanım ve işletim sistemleri cold boot saldırılarına karşı çeşitli önlemler geliştirmiştir. Memory Overwrite Request (MOR) gibi mekanizmalar yeniden başlatma sırasında belleğin temizlenmesini amaçlar; bellek adresleme ve karıştırma teknikleri ise kalan verinin yorumlanmasını güçleştirir. Segerdahl ve Saarinen (2018), bu önlemlere rağmen bazı koşullarda cold boot saldırılarının tamamen ortadan kalkmadığını göstermiştir.

5.3. Parola ve Sözlük Temelli Yöntemler

BitLocker birimi parola veya kurtarma parolasıyla korunuyorsa, anahtara ulaşmanın bir yolu da parola tahmini ya da sözlük saldırılarıdır. Agostini ve Bernaschi (2019), BitCracker aracılığıyla BitLocker parolalarına karşı GPU destekli denemeler yapılabileceğini göstermiştir. Bu yaklaşımda çok sayıda SHA-256 ve AES işlemi paralel biçimde yürütülerek aday parolalar sınanır. Bu yöntemin başarısı doğrudan parolanın niteliğine bağlıdır. Kısa, tahmin edilebilir veya daha önce sızmış parolalar makul sürede bulunabilirken, yeterince uzun ve rastgele parolalar pratikte ulaşılamaz hâle gelir. Ayrıca varsayılan TPM-only yapılandırmada kullanıcı parolası bulunmadığı için sözlük saldırısı doğrudan uygulanabilir bir seçenek değildir. Bu nedenle parola temelli yöntemler ancak uygun anahtar koruyucu türü kullanıldığında anlamlıdır.

5.4. Yöntemlerin Karşılaştırmalı Değerlendirmesi

Aşağıdaki tablo, BitLocker anahtarlarına erişimde kullanılan başlıca yöntemleri adli bilişim açısından önemli ölçütler üzerinden karşılaştırmaktadır. Tablo, özellikle fiziksel müdahale gereksinimi ile geride iz bırakma olasılığı arasındaki farkları görünür kılmaktadır.

Tablo 1. BitLocker anahtarı elde etme yöntemlerinin karşılaştırması.

Yöntem	Hedef	Fiziksel Müdahale	İz Bırakma	Süre
TPM dinleme	VMK (veri yolu)	Yüksek (lehim/prob)	Kalıcı iz olası	Saatler
Cold boot	VMK (RAM)	Orta (modül erişimi)	Düşük	Dakikalar
Sözlük saldırısı	Parola/kurtarma	Yok	Yok (çevrimdışı)	Değişken
BitPixie	VMK (RAM)	Düşük (yalnızca erişim)	Çok düşük	~5 dakika

Not. Tablo, yöntemlerin fiziksel müdahale gereksinimi ve iz bırakma olasılığı bakımından genel bir karşılaştırmasını sunmaktadır.

Tablodan da görülebileceği gibi, donanım temelli yöntemler çoğu zaman daha fazla uzmanlık, ekipman ve fiziksel müdahale gerektirir. Bellek temelli yöntemler daha kısa sürede sonuç verebilse de koşullara son derece duyarlıdır. BitPixie ise yazılım temelli yapısı, sınırlı fiziksel temas gerektirmesi ve düşük iz bırakma olasılığı nedeniyle diğer yöntemlerden ayrılır. Bu özellikleri, yöntemi hem adli bilişim uygulayıcıları hem de kötüye kullanım riski bakımından önemli kılar.

6. BİTPIXİE YÖNTEMİ (CVE-2023-21563)

6.1. Zafiyetin Kökeni ve Tarihçesi

BitPixie, Windows Boot Manager'daki bir kusurla ilişkilendirilen ve CVE-2023-21563 numarasıyla izlenen zafiyet için kullanılan addır. Zafiyetin ilk olarak 2022 yılında "Rairii" takma adlı bir araştırmacı tarafından tespit edildiği, Microsoft'un ise Kasım 2022'de düzeltme yayımladığı belirtilmektedir (Lambertz, 2024). Buna rağmen konu, eski ve zafiyetli önyüklem bileşenlerinin hâlâ geçerli imzalarla çalıştırılabilmesi nedeniyle güncelliğini korumuştur.

Zafiyetin temelinde, PXE yumuşak yeniden başlatma süreci sırasında VMK'nın bellekten beklenen biçimde temizlenmemesi yer alır. SySS araştırmacılarının değerlendirmesine göre, bu davranış 2005 ile 2022 arasında üretilen geniş bir önyüklem yöneticisi ailesini etkileyebilecek niteliktedir (Tanner, 2025). Bu kadar uzun süreli bir etki alanının bulunması, zafiyetin yalnızca tarihsel bir yazılım hatası değil, Secure Boot ekosistemindeki güven varsayımlarını da ilgilendiren daha geniş bir mesele olduğunu göstermektedir.

Konu, Thomas Lambertz'in 38C3'te yaptığı canlı gösterimle daha görünür hâle gelmiştir. Lambertz, güncel Windows 11 kurulu bir sistemde Secure Boot etkin durumdayken ve BitLocker kurtarma anahtarı bilinmeden diske erişimin mümkün olabileceğini göstermiştir (Lambertz, 2024). Sunumda yöntemin kolluk kuvvetleri ve ticari adli bilişim araçları açısından taşıyabileceği pratik değere de dikkat çekilmiştir.

6.2. Temel Mekanizma: PXE Yumuşak Yeniden Başlatma ve VMK Kalıntısı

BitPixie'nin mantığı, BitLocker'ın varsayılan TPM-only yapılandırmasındaki otomatik anahtar yükleme davranışıyla Windows önyüklem yöneticisindeki bellek temizleme kusurunun birleşmesine dayanır. Normal koşullarda VMK'nın, önyüklem sürecinde kullanıldıktan sonra bellekte kalıcı biçimde bırakılmaması beklenir. Ancak PXE yumuşak yeniden başlatma yolu tetiklendiğinde, VMK'nın bellekte kalıntı olarak kalabildiği bildirilmektedir (Tanner, 2025).

Bu noktada asıl mesele, bellekte kalan anahtara nasıl erişileceğidir. Secure Boot etkin bir sistemde herhangi bir yazılımı rastgele çalıştırarak belleği okumak mümkün değildir. BitPixie yaklaşımının dikkat çekici tarafı, Secure Boot'u doğrudan devre dışı bırakmaya çalışmaması; bunun yerine sistemin güvenilir kabul ettiği imzalı bileşenlerin belirli bir bağlamda yeniden kullanılmasına dayanmasıdır. Bu nedenle yöntem, güven zincirinin dışından değil, zincirin kendi varsayımlarından yararlanır.

6.3. Alt Sürüm Düşürme Saldırısı ve Secure Boot'un Yeniden Kullanımı

BitPixie'nin ikinci bileşeni alt sürüm düşürme saldırısıdır. Microsoft zafiyeti yamalamış olsa da eski önyüklem yükleyicilerinin bir kısmı hâlâ güvenilir imzalarla ilişkilidir. Secure Boot imzayı geçerli gördüğünde, bileşenin eski ve zafiyetli olup olmadığı her zaman yeterince ayırt edilemeyebilir. Bu nedenle saldırgan, güncel önyüklem bileşeni yerine eski fakat geçerli imzalı bir bileşeni çalıştırmaya yönelir (Lambertz, 2024).

Kavramsal olarak süreç, hedef sistemin kurtarma veya ağ önyüklem akışına yönlendirilmesi ve zafiyetli önyüklem yolunun tetiklenmesiyle işler. Bu aşamada VMK'nın bellekte kalması sağlanır; ardından bellek içeriğini inceleyebilecek güvenilir bir ortam devreye alınır. Bu makalede, yöntemin yalnızca mantıksal işleyişi açıklanmakta; dosya hazırlama, komut dizileri veya yeniden üretilebilir yapılandırma adımları verilmemektedir.

6.4. VMK'nın Bellekten Elde Edilmesi

VMK bellekte kaldıktan sonra süreç, bu anahtar materyalinin tanımlanmasına odaklanır. Lambertz'in gösteriminde Secure Boot ile başlatılabilen imzalı bir Linux ortamı kullanılmış; bellek

içeriğine erişim için ayrıca başka bir Linux çekirdeği zafiyetinden yararlanıldığı belirtilmiştir (Lambertz, 2024). Tanner'ın alternatif yaklaşımında ise Microsoft tarafından imzalanmış bileşenlerle hazırlanmış bir Windows PE ortamı içinde benzer bir bellek tarama mantığının uygulanabildiği aktarılmaktadır (Tanner, 2025).

Bellek taraması, BitLocker üst verisiyle ilişkili belirli işaretlerin aranması ve VMK'nın bulunduğu alanın ayırt edilmesi esasına dayanır. Anahtar materyali elde edildiğinde, BitLocker biriminin çözülmesi için kullanılabilen adli veya açık kaynaklı araçlara aktarılabilir. Tanner'ın değerlendirmesine göre deneyimli bir uygulayıcı için sürecin bütünü birkaç dakika içinde tamamlanabilecek kadar kısa olabilir (Tanner, 2025). Bu durum, yöntemin adli bilişim açısından neden dikkat çekici olduğunu açık biçimde göstermektedir.

6.5. Adli Bilişim Açısından Değerlendirme

BitPixie'nin adli bilişim bakımından öne çıkan ilk özelliği, girişimsel olmayan yapısıdır. Anakart üzerinde lehimleme, yonga sökme veya kalıcı donanım değişikliği gerektirmemesi, yöntemi klasik TPM dinleme yaklaşımlarından ayırır. İkinci olarak, maliyet ve zaman bakımından daha erişilebilir bir çerçeve sunar. Üçüncü ve belki de en önemli nokta, geride kalıcı iz bırakma olasılığının düşük olmasıdır.

Bu özellikler yöntemi iki yönlü bir tartışmanın merkezine yerleştirir. Bir yandan, hukuka uygun biçimde el konulmuş ve mahkeme kararıyla incelenen cihazlarda erişim sorununu aşmak için güçlü bir teknik imkân sağlayabilir. Öte yandan aynı özellikler, kötü niyetli kişiler için de cazip bir saldırı yüzeyi oluşturur. Adli süreçlerde bu nedenle yöntemin uygulanıp uygulanmadığı, hangi koşullarda uygulandığı, sistem durumunda hangi değişikliklerin olduğu ve elde edilen anahtarın nasıl kullanıldığı ayrıntılı biçimde belgelenmelidir.

Yöntemin iz bırakmama ihtimali, meşru adli incelemelerde belgelendirme sorumluluğunu azaltmaz; tam tersine artırır. Canlı sistem üzerinde yapılan her işlem Locard ilkesi gereği bir temas ve değişim anlamına gelir. Bu nedenle işlem kayıtları, kullanılan araç sürümleri, zaman çizelgesi, ekran kayıtları ve hash değerleri gibi unsurlar, elde edilen bulguların hukuki kabul edilebilirliği açısından belirleyici hâle gelir.

Ayrıca BitPixie yalnızca kapalı veya ele geçirilmiş cihazlara erişim bağlamında düşünülmemelidir. Araştırmalar, PIN bilgisine sahip bir iç tehdit aktörünün bu zafiyeti yerel yetki yükseltme, güvenlik yazılımlarını etkisizleştirme veya ön belleğe alınmış kimlik bilgilerini çıkarma gibi amaçlarla da kullanabileceğini göstermektedir (Tanner, 2025). Bu nedenle konu, kurumsal iç güvenlik ve uç nokta sertleştirme politikaları açısından da önemlidir.

6.6. Azaltma Önlemleri ve Mevcut Durum

BitPixie ve benzeri yöntemlere karşı en etkili önlemlerden biri önyükleme öncesi kimlik doğrulama. Sistem açılmadan önce PIN, USB anahtar veya benzer bir gizli bilgi istenmesi, VMK'nın yalnızca TPM ölçümleriyle otomatik olarak belleğe yüklenmesini engeller. Böylece yöntemin temel dayanağı olan kullanıcı etkileşimi olmadan anahtarın belleğe alınması ortadan kalkar (Lambertz, 2024; Tanner, 2025).

İkinci önemli önlem, alt sürüm düşürme saldırılarının engellenmesidir. Microsoft'un KB5025885 kapsamında yürüttüğü Secure Boot sertifika geçişi, eski ve zafiyetli önyükleme bileşenlerinin güvenilir kabul edilmesini önlemeyi amaçlamaktadır (Microsoft, 2023). Ancak bu süreç yalnızca işletim sistemi güncellemesiyle sınırlı değildir; UEFI ürün yazılımı, sertifika iptalleri ve donanım üreticilerinin güncelleme takvimleriyle de yakından ilişkilidir. Bu nedenle geçiş sürecinin pratikte zamana yayılması beklenmektedir.

Tamamlayıcı önlemler arasında BIOS veya UEFI düzeyinde ağ önyükleme seçeneklerinin sınırlandırılması, gereksiz harici önyükleme yollarının kapatılması, TPM mühürleme politikalarının gözden geçirilmesi ve kurum genelinde BitLocker yapılandırılmalarının merkezi olarak denetlenmesi sayılabilir. Özellikle yüksek riskli ortamlarda TPM-only varsayılanı yerine TPM+PIN veya benzer PBA yaklaşımlarının tercih edilmesi daha sağlam bir güvenlik dengesi sağlar.

7. TARTIŞMA

Bu çalışmada ele alınan yöntemler birlikte değerlendirildiğinde, BitLocker güvenliğinin yalnızca kullanılan şifreleme algoritmasının gücüyle açıklanamayacağı görülmektedir. AES ve XTS gibi kriptografik bileşenler güçlü ve olgun kabul edilse de anahtarın sistem içinde nasıl üretildiği, ne zaman belleğe yüklendiği ve hangi koşullarda serbest bırakıldığı en az algoritmanın kendisi kadar önemlidir. BitPixie örneği, zayıf noktanın çoğu zaman kriptografide değil, varsayılan yapılandırma tercihleri ve önyükleme ekosistemindeki güven ilişkileri içinde ortaya çıktığını göstermektedir.

Kullanıcı deneyimini kolaylaştıran TPM-only yapılandırma, günlük kullanımda fark edilmeyen bir güvenlik katmanı sunar. Ancak bu kolaylık, önyükleme öncesinde kullanıcıdan ek bir sır istenmemesi nedeniyle belirli saldırı senaryolarında risk oluşturur. Adli bilişim açısından bu durum çift anlamlıdır. Bir taraftan, şifreli cihazlara erişim ihtimalini artırarak soruşturmalara katkı sağlayabilir. Diğer taraftan, aynı zayıflığın kötü niyetli kişilerce kullanılması bireysel mahremiyet ve kurumsal güvenlik açısından ciddi sonuçlar doğurabilir.

Adli uygulayıcılar bakımından BitPixie gibi yöntemlerin yükselişi, teknik beceri kadar usul disiplini de öne çıkarır. Şifreli cihazlarda klasik "öl ve imaj al" yaklaşımı her zaman yeterli olmadığından canlı veya yarı canlı müdahaleler kaçınılmaz hâle gelebilir. Böyle durumlarda kullanılan yöntemin amacı, kapsamı, sınırları ve delil üzerindeki etkisi ayrıntılı biçimde kayda geçirilmelidir. Aksi hâlde teknik olarak başarılı bir erişim, hukuki açıdan tartışmalı bir bulguya dönüşebilir.

8. SONUÇ

Bu makalede BitLocker şifreleme anahtarlarının elde edilmesinde kullanılan başlıca yöntemler adli bilişim perspektifiyle incelenmiş ve özellikle BitPixie (CVE-2023-21563) zafiyetine odaklanılmıştır. Değerlendirme üç temel sonuca işaret etmektedir. İlk olarak, BitLocker'a yönelik pratik saldırılar çoğunlukla algoritmayı kırmayı değil, kullanım anında açık hâle gelen VMK'yı elde etmeyi hedefler. İkinci olarak, varsayılan TPM-only yapılandırma cold boot ve BitPixie gibi yöntemler için ortak bir zayıflık zemini oluşturabilir. Üçüncü olarak, BitPixie'nin düşük maliyetli, hızlı ve girişimsel olmayan yapısı, yöntemi hem adli erişim hem de kötüye kullanım riski bakımından ayrıcalıklı bir konuma taşımaktadır.

Savunma açısından en güçlü ve uygulanabilir öneri, önyükleme öncesi kimlik doğrulamanın etkinleştirilmesidir. PIN veya başlangıç anahtarı gerektiren yapılandırmalar, VMK'nın yalnızca TPM ölçümlerine dayanarak otomatik biçimde belleğe yüklenmesini engeller. Böylece yalnızca bugün bilinen BitPixie benzeri zafiyetlere değil, gelecekte önyükleme zincirinde ortaya çıkabilecek benzer sorunlara karşı da daha dayanıklı bir yapı kurulmuş olur.

Microsoft'un Secure Boot sertifika geçişi ve eski önyükleme bileşenlerinin iptali yönündeki adımları önemli olmakla birlikte, bu geçiş tamamlanana kadar varsayılan yapılandırmadaki birçok sistemin risk altında kalabileceği unutulmamalıdır. Gelecek çalışmalar, BitPixie benzeri yöntemlerle elde edilen delillerin hukuki kabul edilebilirliği, ürün yazılımı düzeyindeki korumaların etkinliği ve bellek analizi süreçlerinde yapay zekâ destekli araçların rolü üzerinde daha ayrıntılı durabilir. Tam disk şifreleme ile adli erişim arasındaki gerilim, teknolojinin gelişimiyle birlikte yeni biçimler almaya devam edecektir.

KAYNAKÇA

- Agostini, E., & Bernaschi, M. (2019). BitCracker: BitLocker meets GPUs. arXiv preprint arXiv:1901.01337.
- Andzakovic, D. (2019). Extracting BitLocker keys from a TPM. Pulse Security. <https://pulsesecurity.co.nz/articles/TPM-sniffing>
- Casey, E. (2011). Digital evidence and computer crime: Forensic science, computers, and the internet (3. baskı). Academic Press.

- Ferguson, N. (2006). AES-CBC + Elephant diffuser: A disk encryption algorithm for Windows Vista [Teknik rapor]. Microsoft Corporation.
- Halderman, J. A., Schoen, S. D., Heninger, N., Clarkson, W., Paul, W., Calandrino, J. A., Feldman, A. J., Appelbaum, J., & Felten, E. W. (2009). Lest we remember: Cold-boot attacks on encryption keys. Communications of the ACM, 52(5), 91-98.
- Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2008). IEEE standard for cryptographic protection of data on block-oriented storage devices (IEEE Std 1619-2007). IEEE.
- Kent, K., Chevalier, S., Grance, T., & Dang, H. (2006). Guide to integrating forensic techniques into incident response (NIST Special Publication 800-86). National Institute of Standards and Technology.
- Kornblum, J. D. (2009). Implementing BitLocker Drive Encryption for forensic analysis. Digital Investigation, 5(3-4), 75-84.
- Lambertz, T. (2024, 28 Aralık). Windows BitLocker: Screwed without a screwdriver [Konferans sunumu]. 38th Chaos Communication Congress (38C3), Hamburg, Almanya. <https://media.ccc.de/v/38c3-windows-bitlocker-screwed-without-a-screwdriver>
- Microsoft. (2023). KB5025885: How to manage the Windows Boot Manager revocations for Secure Boot changes. Microsoft Support. <https://support.microsoft.com/>
- MITRE. (2023). CVE-2023-21563: BitLocker Security Feature Bypass Vulnerability. Common Vulnerabilities and Exposures. <https://www.cve.org/CVERecord?id=CVE-2023-21563>
- Segerdahl, O., & Saarinen, P. (2018). Cold boot attacks are still hot [Konferans sunumu]. F-Secure.
- Tanner, M. (2025). Windows local privilege escalation through the bitpixie vulnerability. SySS Tech Blog. <https://blog.syss.com/posts/bitpixie/>
- WithSecure Labs. (2020). Sniff, there leaks my BitLocker key. WithSecure. <https://labs.withsecure.com/publications/sniff-there-leaks-my-bitlocker-key>

SAĞLIK BİLİMLERİ

**Artificial Intelligence in Orthopaedics:
Advancing Prediction of Surgical Outcomes**

Dr Sidar OZTURK

MedicalPark Bahcelievler Hospital, Istanbul

sidarozturk@gmail.com

Orcid 0000-0002-3536-204X

ABSTRACT

Artificial intelligence (AI) is increasingly being integrated into orthopaedic practice, particularly in the prediction of surgical outcomes. This study aims to provide a comprehensive overview of current AI applications in orthopaedics with a focus on outcome prediction models and their potential impact on clinical decision-making. A structured literature review was conducted, including recent studies on machine learning and deep learning techniques applied to orthopaedic datasets derived from clinical, radiological, and perioperative variables.

Existing evidence demonstrates that AI models can effectively predict a wide range of outcomes, including postoperative complications, length of hospital stay, implant survival, readmission rates, and functional recovery following procedures such as total joint arthroplasty, spine surgery, and fracture fixation. Compared to traditional statistical approaches, AI-based methods offer enhanced predictive accuracy and the capacity to process complex, high-dimensional data with nonlinear relationships.

However, several limitations remain, including data heterogeneity, limited external validation, lack of model transparency, and concerns regarding ethical use and data governance. These challenges may restrict the widespread clinical adoption of AI systems. From a clinical perspective, AI-driven prediction models may support surgeons in preoperative risk stratification, surgical planning, and personalized patient counselling.

Future research should focus on large-scale, multicenter prospective validation studies, improved model interpretability, and seamless integration of AI tools into clinical workflows. Addressing these challenges will be essential to fully realize the potential of AI in improving patient outcomes and advancing precision orthopaedic care.

Keywords: artificial intelligence, machine learning, orthopaedics, outcome prediction, surgery

INTRODUCTION

Artificial intelligence (AI) has emerged as a transformative force in modern medicine, driven by rapid advancements in computational power and the availability of large-scale healthcare data (Topol, 2019; Esteva et al., 2019). In particular, machine learning and deep learning techniques have demonstrated the ability to identify complex, nonlinear relationships within clinical datasets, offering new opportunities for improving patient outcomes and clinical decision-making (Beam & Kohane, 2018; Rajkomar et al., 2019).

Orthopaedics represents a particularly suitable field for the application of AI due to its reliance on multifactorial decision-making processes, including patient characteristics, surgical variables, and postoperative outcomes. Traditional statistical approaches, such as regression models, are often limited in their ability to capture interactions among multiple variables, especially in heterogeneous patient populations (Obermeyer & Emanuel, 2016). In contrast, AI-based models can process high-dimensional data and uncover patterns that are not readily apparent through conventional methods (Yu et al., 2018).

Recent studies have demonstrated the growing role of AI in orthopaedics, including applications in imaging analysis, surgical planning, and outcome prediction (Shah et al., 2020; Campbell et al., 2021). In particular, predictive modeling has become a key area of interest, with the potential to improve risk stratification, optimize resource allocation, and enhance personalized care (Karnuta et al., 2020).

Despite these promising developments, significant challenges remain, including issues related to data quality, model generalizability, and ethical considerations such as algorithmic bias and transparency (Ghassemi et al., 2018; Liu et al., 2019). Therefore, a critical evaluation of the current literature is necessary to better understand the role of AI in orthopaedic outcome prediction.

The aim of this study is to provide a comprehensive review of AI applications in orthopaedics, with a particular focus on predicting surgical outcomes and assessing their clinical relevance. This review specifically focuses on clinically applicable prediction models rather than purely technical developments.

METHODS

This study was conducted as a narrative literature review following established methodological principles for evidence synthesis in emerging technological fields (Ghassemi et al., 2018). A comprehensive search of electronic databases, including PubMed, Scopus, and Web of Science, was performed to identify relevant studies published between 2015 and 2024.

Search terms included combinations of “artificial intelligence,” “machine learning,” “deep learning,” “orthopaedics,” “surgical outcomes,” and “prediction models.” Boolean operators were used to refine the search strategy and maximize coverage of relevant literature.

Studies were included if they evaluated AI-based models for predicting orthopaedic outcomes such as complications, readmission rates, implant survival, and functional recovery. Both retrospective and prospective studies, as well as systematic reviews, were considered. Studies focusing solely on diagnostic imaging without outcome prediction relevance were excluded.

Data extraction focused on study design, population characteristics, type of AI model, outcome measures, and key findings. Due to heterogeneity in methodologies, a qualitative synthesis approach was adopted (Miotto et al., 2018).

RESULTS

- **AI Models in Orthopaedics**

The literature demonstrates a wide range of AI models applied to orthopaedic outcome prediction, including logistic regression with regularization, random forests, support vector machines, and neural networks (Lambrechts et al., 2021). Deep learning models, particularly convolutional neural networks, have also been used in imaging-related predictions (Chen et al., 2021).

- **Predictive Accuracy and Performance**

Several studies have reported superior predictive performance of AI models compared to traditional statistical methods. For example, Ramkumar et al. (2019) demonstrated improved accuracy in predicting postoperative complications following total knee arthroplasty using machine learning techniques. Similarly, Kunze et al. (2020) reported that AI models could effectively predict adverse outcomes and readmission rates.

In spine surgery, Karhade et al. (2019) showed that machine learning algorithms could accurately

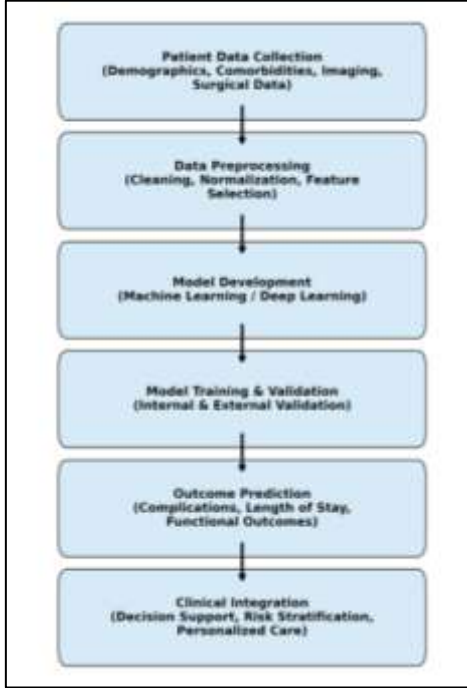


Figure 1: Workflow of Artificial Intelligence-Based Outcome Prediction in Orthopaedics

predict postoperative complications and functional outcomes, highlighting their clinical utility. These findings are consistent with broader evidence suggesting that AI models can outperform conventional approaches in complex clinical scenarios (Rajkomar et al., 2019).

- **Clinical Applications**

AI-driven prediction models have been applied in multiple areas of orthopaedic practice. Preoperative risk stratification is one of the most significant applications, enabling clinicians to identify high-risk patients and tailor treatment strategies accordingly (Karnuta et al., 2020).

In addition, AI has been used to optimize surgical planning and improve patient counseling by providing individualized risk estimates. Predictive models have also been applied in hospital management, including prediction of length of stay and resource utilization (Bini, 2018).

- **Limitations and Challenges**

Despite promising results, several limitations have been identified. Data heterogeneity remains a major concern, as differences in data sources and patient populations can affect model performance (Liu et al., 2019).

Another important limitation is the lack of external validation, which restricts the generalizability of many AI models (Ghassemi et al., 2018). Additionally, the “black box” nature of complex algorithms raises concerns about interpretability and clinical trust (Hashimoto et al., 2018).

Ethical considerations, including bias and data privacy, must also be addressed to ensure responsible implementation of AI in healthcare (Yu et al., 2018).

- **Summary**

A summary of commonly used AI models and their clinical applications in orthopaedic outcome prediction is presented in Table 1.

Study	Model Type	Clinical Application	Predicted Outcome	Performance
Ramkumar et al. (2019)	Machine Learning (Gradient Boosting)	Total Knee Arthroplasty	Postoperative complications	AUC: 0.82
Kunze et al. (2020)	Random Forest	Knee Arthroplasty	Readmission, adverse events	Accuracy: 78%
Karhade et al. (2019)	Machine Learning (Neural Network)	Spine Surgery	Functional outcome, complications	AUC: 0.85
Lambrechts et al. (2021)	Multiple ML Models	General Orthopaedics	Risk prediction	Variable (AUC: 0.75–0.88)
Karnuta et al. (2020)	Predictive Analytics Models	Joint Arthroplasty	Length of stay, complications	Accuracy: 70–80%
Chen et al. (2021)	Deep Learning (CNN)	Fracture Analysis	Outcome prediction support	High sensitivity (>85%)

Table 1: Summary of AI Models Used in Orthopaedic Outcome Prediction

CONCLUSION AND DISCUSSION

Artificial intelligence has demonstrated significant potential in predicting surgical outcomes in orthopaedics, offering improved accuracy and the ability to analyze complex datasets compared to traditional methods. These capabilities may enhance clinical decision-making, particularly in preoperative risk assessment and personalized treatment planning (Topol, 2019).

However, several challenges must be addressed before AI can be fully integrated into routine clinical practice. Standardization of data collection and reporting is essential to improve comparability across studies (Lambrechts et al., 2021). External validation of predictive models is also critical to ensure their reliability in diverse clinical settings (Ghassemi et al., 2018).

Improving model interpretability is another key priority, as clinicians must be able to understand and trust AI-generated predictions (Hashimoto et al., 2018). Furthermore, ethical considerations, including bias and data governance, must be carefully managed (Yu et al., 2018).

From a clinical perspective, AI-driven models have the potential to support surgeons in risk stratification, surgical planning, and patient counseling. Future research should focus on prospective multicenter studies, development of transparent algorithms, and integration of AI tools into clinical workflows.

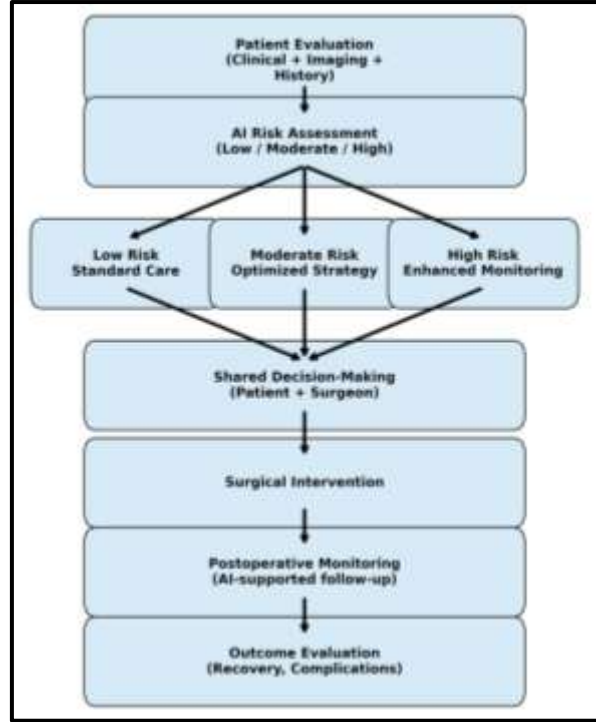


Figure 2: AI-Assisted Clinical Decision-Making Pathway in Orthopaedic Surgery

In conclusion, while challenges remain, AI represents a promising tool for improving surgical outcome prediction and advancing precision medicine in orthopaedics.

REFERENCES

1. Esteva, A., Robicquet, A., Ramsundar, B., Kuleshov, V., DePristo, M., Chou, K., ... Dean, J. (2019). A guide to deep learning in healthcare. *Nature Medicine*, 25(1), 24–29.
2. Topol, E. (2019). High-performance medicine: The convergence of human and artificial intelligence. *Nature Medicine*, 25(1), 44–56.
3. Shah, R. F., Bini, S. A., & Martinez, J. A. (2020). Artificial intelligence and machine learning in orthopaedic surgery. *Journal of Bone and Joint Surgery*, 102(2), 115–123.
4. Ramkumar, P. N., Karnuta, J. M., Navarro, S. M., Haerberle, H. S., Scuderi, G. R., Mont, M. A., & Iorio, R. (2019). Deep learning in orthopaedics. *Journal of Arthroplasty*, 34(10), 2200–2205.
5. Senders, J. T., Zaki, M. M., Karhade, A. V., Chang, B., Gormley, W. B., Broekman, M. L., & Arnaout, O. (2018). Machine learning in neurosurgery: A systematic review. *Neurosurgery*, 83(2), 181–192.
6. Beam, A. L., & Kohane, I. S. (2018). Big data and machine learning in health care. *JAMA*, 319(13), 1317–1318.
7. Obermeyer, Z., & Emanuel, E. J. (2016). **Predicting the Future — Big Data, Machine Learning, and Clinical Medicine.** *NEJM*, 375(13), 1216–1219.

8. Lambrechts, M. J., et al. (2021). Machine learning in orthopaedics: A scoping review. *Acta Orthopaedica*, 92(1), 1–9.
9. Karhade, A. V., et al. (2019). Predicting outcomes in spine surgery using machine learning. *Spine Journal*, 19(7), 1170–1180.
10. Kunze, K. N., et al. (2020). Machine learning algorithms predict complications after TKA. *Journal of Arthroplasty*, 35(4), 102–108.
11. Karnuta, J. M., et al. (2020). The role of AI in joint arthroplasty. *Current Reviews in Musculoskeletal Medicine*, 13(3), 358–366.
12. Bini, S. A. (2018). Artificial intelligence in orthopaedics. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, 476(8), 1607–1609.
13. Campbell, I. M., et al. (2021). Artificial intelligence in orthopaedic imaging and prediction. *Radiology*, 298(1), 19–29.
14. Chen, J., et al. (2021). Deep learning in fracture detection. *Nature Biomedical Engineering*, 5(1), 10–19.
15. Ghassemi, M., Naumann, T., Schulam, P., Beam, A. L., Chen, I. Y., & Ranganath, R. (2018). A review of challenges and opportunities in machine learning for health. *AMIA Summits on Translational Science Proceedings*, 2018, 191–200.
16. Rajkomar, A., Dean, J., & Kohane, I. (2019). Machine learning in medicine. *The New England Journal of Medicine*, 380(14), 1347–1358.
17. Yu, K. H., Beam, A. L., & Kohane, I. S. (2018). Artificial intelligence in healthcare. *Nature Biomedical Engineering*, 2(10), 719–731.
18. Hashimoto, D. A., Rosman, G., Rus, D., & Meireles, O. R. (2018). Artificial intelligence in surgery: Promises and perils. *Annals of Surgery*, 268(1), 70–76.
19. Liu, Y., Chen, P.-H. C., Krause, J., & Peng, L. (2019). How to read articles that use machine learning: Users' guides to the medical literature. *JAMA*, 322(18), 1806–1816.
20. Miotto, R., Wang, F., Wang, S., Jiang, X., & Dudley, J. T. (2018). Deep learning for healthcare: Review, opportunities and challenges. *Briefings in Bioinformatics*, 19(6), 1236–1246.

Corneal Changes in Diabetes: An Early Marker of Systemic Microvascular Damage

Dr Sibel Zorlu Ozturk

MedicalPark Bahcelievler Hospital

Orcid: 0009-0000-1491-6501

Abstract

Diabetes mellitus (DM) is a chronic metabolic disease associated with progressive microvascular and neuropathic complications affecting multiple organ systems. While diabetic retinopathy has traditionally been considered the primary ophthalmic manifestation of diabetes, increasing evidence suggests that corneal changes may occur earlier and reflect systemic microvascular dysfunction before clinically detectable retinal disease develops. The cornea is a uniquely accessible and transparent tissue that allows for non-invasive assessment of structural, neural, and endothelial changes associated with chronic hyperglycemia.

Recent advances in ocular imaging technologies, particularly in live confocal microscopy (IVCM) and anterior segment optical coherence tomography (AS-OCT), have enabled a detailed assessment of corneal morphology and nerve architecture in patients with diabetes. Studies have demonstrated reduced corneal nerve fiber density, altered nerve morphology, increased corneal thickness, endothelial dysfunction and impaired epithelial healing in both type 1 and type 2 DM. Importantly, many of these changes appear to correlate with disease duration, glycemic control and severity of diabetic peripheral neuropathy.

Corneal nerve alterations have emerged as particularly promising biomarkers because they may precede diabetic retinopathy and other clinically apparent microvascular complications. Quantitative analysis of the corneal subbasal nerve plexus has therefore gained increasing interest as a potential non-invasive method for early detection of diabetic neuropathy and systemic microvascular injury.

This review examines the structural and functional corneal changes observed in DM, explores the role of modern imaging technologies in detecting early ocular abnormalities, and discusses the potential clinical relevance of corneal biomarkers in predicting systemic diabetic complications.

Introduction

DM is one of the most important chronic diseases affecting global health and is associated with significant morbidity and mortality due to its systemic vascular complications (Bikbova et al., 2012). Chronic hyperglycemia contributes to progressive endothelial dysfunction, oxidative stress, chronic inflammation, and microvascular injury involving multiple organ systems, including the retina, kidney,

peripheral nerves, and cardiovascular system (Malik et al., 2003; Tavakoli et al., 2010). Ophthalmic complications are among the most recognised manifestations of diabetes, with diabetic retinopathy representing a leading cause of visual impairment worldwide.

However, growing evidence suggests that diabetic ocular involvement extends beyond the retina alone. Increasing attention has been directed toward the cornea, which undergoes substantial structural, metabolic, neural, and functional changes in patients with diabetes (Rosenberg et al., 2000; Bikbova et al., 2012). Unlike retinal tissue, the cornea offers a transparent and easily accessible structure that can be examined non-invasively in real time using modern imaging modalities. This characteristic makes the cornea particularly valuable as a potential biomarker of systemic diabetic microvascular damage.

The cornea is one of the most densely innervated tissues in the human body and relies on a fine balance between epithelial integrity, endothelial function, stromal organization and neural regulation to maintain optical clarity plus normal vision. Diabetes disturbs this steady state through multiple pathophysiological pathways involving advanced glycation end products, oxidative injury, impaired neurotrophic support and vascular dysfunction. As a result, diabetic patients may develop impaired corneal sensitivity, delayed epithelial healing, increased infection risk, altered endothelial morphology and changes in the corneal nerve architecture.

Importantly, several studies suggest that corneal nerve abnormalities may develop before clinically detectable diabetic retinopathy, raising the possibility that corneal imaging could serve as an early indicator of systemic diabetic complications (Petropoulos et al., 2015). This concept has gained increasing interest because diabetic peripheral neuropathy often remains clinically silent during early stages, while traditional diagnostic methods may lack sensitivity for detecting subclinical disease.

This review discusses the major structural and functional corneal changes associated with DM, examines the role of imaging technologies such as in vivo confocal microscopy and anterior segment optical coherence tomography, and evaluates the clinical potential of corneal biomarkers as early indicators of systemic microvascular injury.

Pathophysiology of Corneal Damage in Diabetes

The pathogenesis of diabetic corneal disease is multifactorial and involves metabolic, inflammatory, vascular, and neuropathic mechanisms. Chronic hyperglycemia induces biochemical changes that affect virtually every layer of the cornea.

One of the major mechanisms involves the accumulation of advanced glycation end-products (AGEs), which alter collagen cross-linking, disrupt extracellular matrix organisation and impair cell function. AGEs add to oxidative stress and the activation of inflammatory pathways, further damaging corneal tissues.

Hyperglycemia additionally impairs the corneal epithelial metabolism and reduces the healing capacity of limbal stem cells. Reduced epithelial turnover contributes to delayed wound healing, as well as increased susceptibility to recurrent erosions and infections.

Corneal endothelial dysfunction plays also a major role in diabetic keratopathy. Endothelial cells maintain corneal deturgescence and transparent through active fluid transport functions. Diabetes may reduce endothelial cell density, alter cell morphology and impair pump function, resulting in increased corneal thickness and stromal oedema.

Perhaps the most clinically significant changes occur within the corneal nerves. The corneal subbasal nerve plexus is highly sensitive to metabolic and ischemic injury. Chronic hyperglycemia damages small nerve fibres through oxidative stress, mitochondrial dysfunction, impaired axonal transport, and microvascular ischemia. These changes result in reduced nerve fibre density, increased tortuosity, nerve fragmentation, and decreased corneal sensitivity.

Importantly, corneal nerve alterations are increasingly recognised as part of generalised diabetic small-fibre neuropathy. Because corneal nerves can be visualised non-invasively using confocal microscopy, they provide a unique opportunity to assess peripheral nerve health in vivo.

Corneal Structural Changes in Diabetes:

Increased Corneal Thickness

Multiple studies have shown increased central corneal thickness in diabetic patients compared with non-diabetic controls (Kheirkhah et al., 2018). The basic mechanisms are considered to include endothelial dysfunction, impaired fluid regulation and sorbitol accumulation in corneal tissues.

Increased corneal thickness may have important clinical implications, because it can influence intraocular pressure measurements and potentially affect glaucoma evaluation. Further, stromal oedema may cause reduced optical quality and visual impairments in diabetic patients.

Some studies suggest that corneal thickness correlates with diabetes duration and glycemic control, although results remain somewhat variable across different populations. Poor glycemic regulation appears to be associated with greater endothelial dysfunction and more pronounced corneal swelling.

Endothelial Cell Alterations

Diabetes has been associated with several endothelial abnormalities, including decreased endothelial cell density, increased polymegathism and pleomorphism. Polymegathism refers to variation in endothelial cell size, while pleomorphism describes abnormal variation in cell shape.

These morphological changes indicate cellular stress and reduced endothelial reserve capacity. Although many diabetic patients remain asymptomatic during early stages, endothelial vulnerability may become clinically important following intraocular surgery or additional ocular stress.

Several investigators have reported that diabetic patients experience greater endothelial cell loss after cataract surgery compared with non-diabetic individuals. This observation supports the concept that diabetes impairs corneal endothelial resilience.

Keratocyte Density Changes

Keratocytes are stromal cells responsible for maintaining collagen organisation and corneal transparency. Studies using confocal microscopy have demonstrated altered keratocyte density and morphology in patients with diabetes.

Reduced keratocyte density may reflect chronic metabolic stress and impaired stromal homeostasis. Although the precise clinical significance is incompletely understood, stromal changes may contribute to biomechanical changes and impaired wound healing responses observed in diabetic corneas.

Corneal Nerve Changes and Diabetic Neuropathy

Among all diabetic corneal abnormalities, alterations involving the corneal nerves have received the greatest research attention in recent years.

The cornea contains one of the highest densities of sensory nerve fibres in the human body. These nerves originate primarily from the ophthalmic branch of the trigeminal nerve and form the subbasal nerve plexus located between Bowman's layer and the basal epithelium.

Confocal microscopy studies consistently demonstrate reduced corneal nerve fibre density, decreased nerve branch density, increased tortuosity, and nerve fibre fragmentation in patients with diabetes (Tavakoli et al., 2010; Quattrini et al., 2007). These changes may occur even in patients without clinically apparent diabetic retinopathy.

Reduced corneal sensitivity is another important manifestation of diabetic neuropathy. Corneal hypoesthesia impairs blink reflexes, tear secretion, and epithelial healing, increasing the risk of epithelial breakdown and neurotrophic keratopathy.

Several studies have demonstrated strong correlations between corneal nerve abnormalities and diabetic peripheral neuropathy severity. Corneal nerve fibre loss has also been associated with poor glycemic control and longer disease duration.

Importantly, corneal nerve imaging may detect subclinical small-fibre neuropathy earlier than conventional nerve conduction studies, as small unmyelinated fibres are affected early in the progression of diabetic neuropathy.

This finding has significant clinical implications. Early identification of neuropathic changes could potentially allow earlier therapeutic intervention before irreversible nerve damage develops.

Functional Corneal Changes in Diabetes

Delayed Epithelial Healing

Delayed corneal epithelial healing is one of the most characteristic features of diabetic keratopathy. Diabetic patients may experience prolonged healing following trauma, surgery, or infection.

Several mechanisms play a role in impaired epithelial repair, including diminished epithelial cell migration, decreased growth factor production, impaired nerve-derived trophic support and abnormal extracellular matrix remodelling.

Delayed healing increases the risk of recurrent epithelial defects, stromal ulceration and secondary infections.

Increased Risk of Corneal Infection:

Corneal surface abnormalities combined with impaired epithelial integrity raise susceptibility to infectious keratitis in diabetic individuals.

Reduced tear film stability, altered immune responses, and decreased corneal sensitivity may contribute to delayed recognition of infection and more severe disease progression.

Postoperative corneal infections may also occur more frequently in diabetic patients, particularly in the presence of poor glycemic control.

Reduced Corneal Sensitivity

Corneal sensitivity is often reduced in diabetic patients due to damage to sensory nerve fibres.

Reduced sensitivity contributes to impaired protective reflexes and diminished awareness of ocular surface injury. In severe cases, diabetic patients may develop neurotrophic keratopathy, characterised by persistent epithelial defects and stromal breakdown.

Corneal esthesiometry studies consistently demonstrate lower sensation thresholds in patients with diabetes than healthy controls.

Imaging Technologies in Diabetic Corneal Disease

In Vivo Confocal Microscopy:

In vivo confocal microscopy (IVCM) has become one of the most important tools for evaluating diabetic corneal changes.

IVCM allows high-resolution visualisation of corneal cells and nerves at the microscopic level in living patients. The technique provides a detailed assessment of epithelial morphology, keratocyte density, endothelial structure, and especially the subbasal nerve plexus.

Quantitative parameters commonly evaluated include:

- corneal nerve fibre density,
- nerve branch density,
- nerve fibre length,
- tortuosity,
- and nerve beadings.

Numerous studies have demonstrated that corneal nerve parameters obtained by IVCM correlate with the severity of diabetic peripheral neuropathy (Ahmed et al., 2012; Pritchard et al., 2015).

Because IVCM is non-invasive, rapid, and repeatable, it has emerged as a promising biomarker for longitudinal monitoring of diabetic neuropathy.

Anterior Segment Optical Coherence Tomography

Anterior segment optical coherence tomography (AS-OCT) provides non-contact cross-sectional imaging of the cornea and anterior ocular structures.

AS-OCT allows accurate measurement of corneal thickness and assessment of stromal and epithelial morphology. The technology is particularly useful for detecting subtle structural changes and monitoring postoperative healing.

Although AS-OCT does not provide the same cellular-level detail as confocal microscopy, it offers excellent reproducibility and broad clinical accessibility.

Quantitative Corneal Analysis

Advances in digital image analysis and artificial intelligence have further expanded the potential role of corneal imaging in diabetes.

Automated algorithms can now quantify nerve fibre density, branching patterns, and nerve tortuosity with increasing precision. Machine learning approaches may eventually allow automated risk stratification based on corneal imaging biomarkers.

These developments may improve standardisation and increase the clinical applicability of corneal nerve analysis in routine diabetic care.

Clinical Correlations

Corneal abnormalities in diabetes frequently correlate with several systemic clinical parameters.

Disease Duration

Longer diabetes duration has consistently been associated with greater corneal nerve loss and endothelial dysfunction.

Patients with longstanding diabetes often demonstrate more severe reductions in corneal nerve fibre density and increased morphological abnormalities.

Glycemic Control

Poor glycemic control appears strongly associated with the progression of corneal abnormalities.

Elevated HbA1c levels have been linked to reduced nerve fibre density, impaired corneal sensitivity, and increased epithelial complications.

Some studies suggest that improved glycemic regulation may partially stabilise or slow the progression of corneal nerve damage.

Peripheral Neuropathy

Perhaps the most important correlation involves diabetic peripheral neuropathy.

Corneal nerve abnormalities closely parallel peripheral small-fibre nerve injury and may reflect generalised neuropathic disease activity.

Several studies suggest that corneal confocal microscopy may detect neuropathic abnormalities earlier than conventional neurological testing methods.

This has generated considerable interest in using corneal imaging as a screening tool for early diabetic neuropathy.

Corneal Changes as Early Biomarkers of Microvascular Damage

One of the most important emerging concepts in diabetic eye disease is that corneal nerve changes may precede clinically detectable diabetic retinopathy.

Traditional diabetic ophthalmic evaluation focuses primarily on retinal vascular changes. However, retinal abnormalities often become detectable only after substantial microvascular injury has already occurred.

In contrast, corneal nerve alterations may develop during earlier stages of diabetic disease.

This observation raises important clinical possibilities. If corneal nerve imaging can reliably identify early neuropathic and microvascular changes before retinal damage develops, clinicians may gain an opportunity for earlier intervention and risk stratification.

Several investigators have proposed that corneal confocal microscopy may serve as a surrogate biomarker of systemic small-fibre neuropathy and generalised microvascular dysfunction.

Because the examination is rapid, non-invasive, and repeatable, corneal imaging could potentially become part of routine diabetic assessment in the future.

Nevertheless, several challenges remain before widespread clinical implementation becomes feasible.

Discussion

The findings discussed throughout this review support the growing concept that the cornea may function as an accessible biomarker of systemic diabetic microvascular injury. Traditionally, diabetic ocular assessment has focused primarily on retinal pathology because diabetic retinopathy represents one of the most visually significant complications of DM. However, increasing evidence suggests that corneal abnormalities, particularly alterations in corneal nerves, may develop earlier than clinically detectable retinal disease (Petroopoulos et al., 2015).

One of the most important observations in recent years has been the close relationship between corneal nerve morphology and the severity of diabetic peripheral neuropathy. Multiple studies using in vivo confocal microscopy have demonstrated that reductions in corneal nerve fibre density correlate strongly with small-fibre neuropathy and may predict future neuropathic progression (Tavakoli et al., 2010; Pritchard et al., 2015). These findings suggest that corneal nerve imaging may offer a unique, non-invasive means to detect systemic neuropathic injury at early disease stages.

The accessibility and transparency of the cornea represent major clinical advantages. Unlike retinal imaging, which primarily reflects advanced microvascular disease, corneal imaging may reveal subtle neural and structural abnormalities before irreversible complications become clinically apparent. This characteristic increases the potential value of corneal biomarkers for early risk stratification and longitudinal monitoring.

Another important aspect is the development of quantitative imaging technologies. Advances in confocal microscopy, AS-OCT and digital image analysis have markedly improved the reproducibility of the corneal assessment. Automated nerve quantification systems and artificial intelligence-assisted analysis may further improve standardisation and facilitate inclusion in routine diabetic care in the future.

Nevertheless, several important challenges remain. Corneal nerve measurements may vary according to imaging protocols, software algorithms, patient demographics, and examiner experience. Lack of universally accepted diagnostic thresholds currently limits widespread clinical application. Furthermore, many available studies remain cross-sectional, making it difficult to establish definitive causal relationships between corneal abnormalities and systemic diabetic outcomes.

In spite of these limitations, the available evidence convincingly supports the ongoing study of the role of the corneal biomarkers in DM. Future multicenter longitudinal studies with standardised imaging methods will be crucial to determine whether corneal imaging can reliably predict systemic diabetic complications and guide earlier management plans.

Constraints and Difficulties

Despite promising results, important limitations continue to affect the interpretation and clinical application of corneal biomarkers. A primary difficulty is the variation in imaging acquisition and evaluation techniques between different centers and devices. The lack of standardised normative thresholds also limits comparability across studies. Corneal nerve parameters can vary according to age, imaging methodology and software analysis systems.

Another limitation involves the cross-sectional design of many available studies. Longitudinal investigations are still needed to clarify whether corneal changes predict future diabetic complications independently of established clinical risk factors.

Additionally, although confocal microscopy provides excellent detail, availability remains limited in many clinical settings. Standardisation of image acquisition protocols and automated quantitative analysis may help overcome some of these barriers in the future.

Future Directions

Future research should focus on validating corneal biomarkers in large multicenter longitudinal studies.

Further investigation is needed to determine:

- The predictive value of corneal nerve changes,
- optimal diagnostic thresholds,
- relationships with cardiovascular and renal complications,
- The impact of clinical interventions on corneal nerve regeneration.

Artificial intelligence-assisted image analysis may also improve diagnostic accuracy and facilitate inclusion into routine clinical practice.

Additionally, therapies targeting oxidative stress, inflammation, and neurotrophic pathways may eventually help prevent or reverse diabetic corneal neuropathy.

Corneal imaging may therefore evolve beyond a purely diagnostic role and become useful for monitoring treatment response and disease progression.

Conclusion

DM produces substantial structural, neural and functional changes in the cornea. These alterations include increased corneal thickness, endothelial dysfunction, impaired epithelial healing, reduced corneal sensitivity and especially progressive corneal nerve fiber loss. Among these data, corneal nerve abnormalities appear particularly important because they may reflect early systemic microvascular and neuropathy injury before clinically detectable diabetic retinopathy develops.

Modern imaging technologies, such as in vivo confocal microscopy and anterior segment optical coherence tomography, now allow detailed non-invasive evaluation of diabetic corneal changes. Growing evidence supports the concept that corneal biomarkers may provide valuable insight into systemic diabetic complications, particularly peripheral neuropathy and microvascular dysfunction. Although additional standardisation and longitudinal validation remain necessary, the cornea represents a promising and accessible window into systemic diabetic disease.

Future integration of corneal imaging into routine diabetic assessment may improve early detection, risk stratification, and monitoring of systemic diabetic complications.

References

1. Malik RA, Kallinikos P, Abbott CA, et al. Corneal confocal microscopy: a non-invasive surrogate of nerve fibre damage and repair in diabetic patients. *Diabetologia*. 2003;46(5):683–688.
2. Tavakoli M, Quattrini C, Abbott C, et al. Corneal confocal microscopy: a novel noninvasive test to diagnose and stratify the severity of human diabetic neuropathy. *Diabetes Care*. 2010;33(8):1792–1797.
3. Bikbova G, Oshitari T, Tawada A, Yamamoto S. Corneal changes in diabetes mellitus. *Curr Diabetes Rev*. 2012;8(4):294–302.
4. Rosenberg ME, Tervo TM, Immonen IJ, Muller LJ, Gronhagen-Riska C, Vesaluoma MH. Corneal structure and sensitivity in type 1 diabetes mellitus. *Invest Ophthalmol Vis Sci*. 2000;41(10):2915–2921.
5. Dehghani C, Pritchard N, Edwards K, et al. Risk factors associated with corneal nerve alteration in type 1 diabetes in the absence of neuropathy: a longitudinal in vivo corneal confocal microscopy study. *Cornea*. 2016;35(6):847–852.
6. Petropoulos IN, Green P, Chan AW, et al. Corneal confocal microscopy detects neuropathy in patients with type 1 diabetes without retinopathy or microalbuminuria. *PLoS One*. 2015;10(4):e0123517.
7. Quattrini C, Tavakoli M, Jeziorska M, et al. Surrogate markers of small fiber damage in human diabetic neuropathy. *Diabetes*. 2007;56(8):2148–2154.
8. Kheirikhah A, Muller R, Mikolajczak J, et al. Corneal endothelial cell dysfunction in diabetes mellitus. *Cornea*. 2018;37(4):448–454.
9. Pritchard N, Edwards K, Russell AW, et al. Corneal confocal microscopy predicts 4-year incident peripheral neuropathy in type 1 diabetes. *Diabetes Care*. 2015;38(4):671–675.
10. Ahmed A, Bril V, Orszag A, et al. Detection of diabetic sensorimotor polyneuropathy by corneal confocal microscopy in type 1 diabetes: a concurrent validity study. *Diabetes Care*. 2012;35(4):821–828.

BIOLOGICAL AUGMENTATION IN BONE HEALING: DOES IT REALLY IMPROVE OUTCOMES?

Dr Zafer Volkan GOKCE

Orthopaedics and Traumatology Surgeon
MedicalPark Bahcelievler Hospital, Istanbul

Volkangokce@gmail.com

ORCID: 0000-0002-4712-3732

ABSTRACT

Biological augmentation has become a central theme in contemporary orthopaedic trauma and reconstruction because mechanical stability alone does not reliably overcome an unfavourable biologic environment. Delayed union, nonunion, critical-sized defects, revision arthrodesis, and biologically compromised fractures frequently require adjuvant strategies aimed at restoring osteogenesis, osteoinduction, osteoconduction, angiogenesis, and host responsiveness. This review evaluates the current literature on the major biological augmentation options used in bone healing, with particular emphasis on autologous bone grafting, platelet-rich plasma (PRP), bone marrow aspirate and bone marrow aspirate concentrate (BMA/BMAC), bone morphogenetic proteins (BMPs), induced-membrane strategies, and composite orthobiologic constructs developed within the “diamond concept.” The literature consistently supports autologous graft as the benchmark because it provides living cells, matrix, and signalling molecules in a single intervention. BMPs have the strongest randomized clinical evidence in selected indications, especially open tibial fractures, yet cost and adverse-event concerns limit universal adoption. BMAC and PRP remain biologically appealing and clinically promising, but their evidence base is heterogeneous because of major variation in processing, carrier materials, concomitant fixation, and outcome definitions. Across modalities, the most reproducible message is that orthobiologics work best when the mechanical environment is optimized and patient-specific risk factors are addressed. Biological augmentation does improve outcomes in selected contexts, but current evidence supports targeted rather than routine use. Future progress depends on protocol standardization, comparative trials, and phenotype-driven indication selection.

INTRODUCTION

Successful fracture healing depends on a coordinated sequence of inflammatory signalling, stem-cell recruitment, angiogenesis, callus formation, and remodeling. Although bone has an exceptional regenerative capacity compared with many adult tissues, union fails when this biologic program is disrupted by poor vascularity, infection, inadequate stability, soft-tissue compromise, smoking, metabolic disease, or repeated surgery. Einhorn and Gerstenfeld (2015) described fracture repair as a complex biologic cascade rather than a single event, and this framework remains fundamental when considering why augmentation may be necessary in selected patients. Contemporary nonunion care therefore no longer views biology as secondary to fixation; instead, biologic competence is treated as a core determinant of outcome.

The modern interest in biological augmentation also reflects a broader conceptual shift in orthopaedics. Giannoudis, Einhorn, and Marsh (2007) proposed the “diamond concept,” arguing that reliable bone healing requires not only cells, scaffolds, and growth factors, but also an adequate mechanical environment and vascularity. Calori et al. (2011) later expanded this clinical logic by emphasizing the “biological chamber,” namely the local and systemic conditions that determine whether implanted orthobiologics can function effectively. In practical terms, this means that no biologic adjunct is likely to rescue an unstable construct, eradicate an untreated infection, or overcome major host deficiencies on its own. The question is therefore not simply whether a given product is biologically active, but whether it improves clinically meaningful outcomes when used in an optimized treatment plan.

Autologous bone grafting remains the historical reference standard because it offers osteogenic cells, osteoinductive proteins, and an osteoconductive scaffold simultaneously. However, Younger and Chapman (1989) demonstrated that graft harvest is associated with real donor-site morbidity, including persistent pain, hematoma, infection, and sensory disturbance. Interest in less morbid alternatives has therefore intensified over the past two decades. At the same time, the expanding orthobiologic marketplace has sometimes outpaced the quality of evidence, making critical appraisal essential. Positive mechanistic data, animal studies, and small case series have often been extrapolated too confidently into routine clinical practice.

Platelet-rich plasma, BMAC, recombinant BMPs, induced-membrane techniques, reamer-irrigator-aspirator (RIA) graft harvest, and composite scaffold-cell-growth factor systems now occupy a large part of the reconstructive conversation. Each aims to strengthen one or more of the biologic pillars of healing. PRP is intended to deliver supraphysiologic concentrations of platelets and platelet-derived mediators at the repair site. BMA/BMAC aims to supply mesenchymal stromal cells, hematopoietic cells, cytokines, and accessory growth factors. BMPs provide direct osteoinductive signalling. RIA harvest and Masquelet-type strategies are often discussed as procedural adjuncts because they create biologically favorable graft material or local chambers rather than functioning as single injectable products.

Yet the literature is not uniform. Some systematic reviews report improved union rates or shorter healing times, whereas others conclude that data are too heterogeneous or too weak to justify broad recommendations. Recent reviews on PRP, BMAC, and orthobiologics in delayed union and nonunion all highlight the same obstacles: small sample sizes, mixed indications, inconsistent processing methods, and poorly standardized outcomes (Jamal et al., 2022; Moyal et al., 2024; Impieri et al., 2024). As a result, clinicians often face a gap between biologic plausibility and evidence-based indication.

This review addresses that gap. It examines the biologic rationale for augmentation, summarizes the major clinical modalities, evaluates the relative strength of current evidence, and discusses where these therapies appear to add meaningful value. The goal is not to promote orthobiologics as universally effective, but to clarify when biological augmentation seems to improve outcomes and when enthusiasm exceeds evidence.

METHOD

This article was designed as a narrative multi-literature review focused on clinically relevant biological augmentation strategies for bone healing. Searches were performed in PubMed, Scopus, and Web of Science for English-language publications from 2000 through early 2026, with additional landmark earlier studies included when they were foundational to the field. Search combinations included “bone healing,” “fracture healing,” “delayed union,” “nonunion,” “biological augmentation,” “orthobiologics,” “platelet-rich plasma,” “bone marrow aspirate concentrate,” “bone morphogenetic protein,” “autologous bone graft,” “diamond concept,” “Masquelet,” and “reamer irrigator aspirator.”

Priority was given to randomized controlled trials, prospective cohort studies, systematic reviews, meta-analyses, major narrative reviews, and influential mechanistic papers that shaped clinical practice. Experimental and translational studies were included when they clarified the mechanism of action of PRP, BMPs, marrow-derived products, or graft-based reconstruction. Case reports and very small technical series were used sparingly and only when they illustrated emerging indications rather than serving as primary evidence.

The literature was synthesized qualitatively because direct meta-analytic pooling across all modalities was not appropriate. The biologics reviewed differ substantially in formulation, carrier choice, dose, fixation context, contamination risk, and target pathology. Acute fractures, delayed union, aseptic nonunion, septic nonunion, arthrodesis nonunion, and critical-sized defects cannot reasonably be treated as one homogeneous clinical entity. For this reason, the analysis emphasizes patterns of evidence, indication-specific strengths, and recurring limitations across the literature rather than numerical aggregation alone.

OVERVIEW OF CURRENT EVIDENCE

The available literature suggests that biological augmentation may be best understood as a spectrum rather than a single intervention class.. The most consistent evidence favours biologic strategies that are integrated with sound mechanical revision, debridement when necessary, and host optimization. Across studies, outcomes are strongly influenced by whether augmentation is used in acute trauma, aseptic nonunion, infected nonunion, or segmental defect reconstruction.

A useful first distinction is between augmentation methods that primarily supply cells and matrix, and those that primarily supply signalling molecules. Autologous graft and marrow-derived products sit closer to the cell-and-matrix end of the spectrum. BMPs and PRP are more signal-heavy, though PRP may also influence early clot architecture and local inflammatory behaviour. Composite constructs such as BMAC combined with cancellous allograft, platelet-rich fibrin, or scaffold materials seek to reproduce the full biologic environment proposed by the diamond concept. The overall biological augmentation spectrum is illustrated in Figure 1.

Autologous bone grafting still occupies the strongest clinical position. Giannoudis et al. (2005) described autograft as the ideal grafting material because it simultaneously provides osteogenic cells, osteoinductive factors, and an osteoconductive framework. Its superiority is especially apparent when

bone loss, avascular bone ends, or revision surgery demand bulk graft and biologic potency together. Nevertheless, the persistent relevance of autograft does not mean it is problem-free. Younger and Chapman (1989) documented clinically meaningful donor-site morbidity, and more recent work has continued to show that iliac crest harvest is associated with pain, blood loss, longer operative time, and occasional structural complications (Tonk et al., 2022). These drawbacks explain why procedures such as RIA harvest and cell-based augmentation have become increasingly attractive.

BMPs have the strongest high-level evidence among commercially used orthobiologics. The landmark randomized study by Govender et al. (2002) in 450 patients with open tibial fractures found that rhBMP-2 added to standard care improved healing-related outcomes in a selected trauma population. A later trial by Aro et al. (2011) extended interest in rhBMP-2 to reamed intramedullary nailing settings. Subsequent reviews and meta-analyses, however, have tempered early enthusiasm. Griffin et al. (2012) concluded in the Cochrane review that BMPs may improve some union-related outcomes in acute tibial fractures but that evidence is not sufficiently broad to justify indiscriminate use across all fracture settings. Lissenberg-Thunnissen et al. (2011) likewise emphasized that efficacy depends heavily on indication, dose, carrier, and local environment. In contemporary practice, BMPs are therefore best seen as potent but selective tools: particularly useful when osteoinduction is inadequate, but limited by cost, regulatory restrictions, soft-tissue concerns, and questions about adverse events in certain anatomical locations.

Marrow-derived augmentation has one of the most intuitive biologic rationales because it introduces progenitor-rich material directly into compromised healing sites. Hernigou et al. (2005) published one of the field's most influential clinical studies by demonstrating that percutaneous autologous bone-marrow grafting could be effective for atrophic tibial diaphyseal nonunion and that success correlated with progenitor cell concentration. This finding remains conceptually important: marrow aspiration is not simply about volume delivery but about biologic dose. Later clinical literature has attempted to exploit this principle through concentration systems that create BMAC. Recent systematic review evidence summarized by Moyal et al. (2024) suggests that union rates above 80% are frequently reported in long-bone delayed union and nonunion treated with bone marrow or BMAC, especially in aseptic settings, although study heterogeneity remains substantial. Lin et al. (2021) compared BMAC plus cancellous allograft with iliac crest bone graft in long-bone nonunion and found comparable outcomes in a retrospective cohort, supporting the idea that cell-enhanced graft substitutes may reduce the need for autograft in selected cases. Benshabat et al. (2021) reported high healing rates when BMAC was added during revision surgery for clavicle fracture nonunion, while Mazzotta et al. (2021) showed encouraging acceleration of healing in upper-limb nonunion when BMAC and platelet-rich fibrin were incorporated into a composite biological strategy.

Even so, BMAC remains difficult to standardize. Aspirate site, aspiration technique, anticoagulant use, centrifugation protocol, final cell yield, presence or absence of scaffold, and the revision strategy performed at the same sitting all vary widely between studies. This makes it difficult to determine whether good outcomes are driven by the concentrate itself, by improved mechanical correction and

debridement, or by the combined effect of both. The current literature therefore supports BMAC as a promising adjunct rather than a universally validated replacement for autograft.

PRP occupies a more controversial position. Its biological logic is attractive because platelets release PDGF, TGF- β , VEGF, IGF, and additional mediators involved in early repair and angiogenesis. Marx (2004) helped popularize the concept of platelet concentration as a regenerative tool, and PRP's relative ease of preparation made it one of the most rapidly adopted orthobiologics in musculoskeletal care. However, bone healing is not equivalent to tendon healing or symptomatic osteoarthritis, and fracture-related PRP data are far less consistent than many clinicians initially hoped. Zhang et al. (2021) systematically reviewed preclinical and clinical evidence and found that animal and in vitro studies were generally positive, whereas clinical data remained limited and more equivocal. Jamal et al. (2022) concluded that PRP may play a clinical role in bone healing but emphasized that standardized randomized trials are still needed. Xu et al. (2022) reported meta-analytic evidence that PRP may reduce time to healing in some fracture settings, but effect size consistency was limited. Van Lieshout et al. (2021) reached a similarly cautious conclusion, describing PRP as biologically plausible but not conclusively established for routine fracture augmentation. More recent narrative reviews, including Bacevich et al. (2024), have reinforced an important distinction: PRP appears more compelling when used as part of a broader composite strategy or in biologically poor environments than as a stand-alone universal enhancer.

A recurring pattern across the PRP literature is formulation dependence. Leukocyte-rich and leukocyte-poor PRP are often grouped together despite having meaningfully different inflammatory profiles. Some studies use PRP gel, others liquid injectate, and others activated fibrin matrices. Fracture type, fixation strategy, and timing of application also vary considerably. These differences make "PRP" a category label rather than a single reproducible intervention. As a result, a negative or positive trial may not translate well beyond its own preparation protocol.

Another important theme in the recent literature is the role of composite reconstruction. The diamond concept and its later clinical adaptations suggest that isolated biologic interventions may be less effective than integrated biologic chambers combining cells, signals, scaffold, and stable fixation. Andrzejowski et al. (2019) emphasized that long-bone nonunion management often benefits from this multidimensional framework. In practice, this may mean combining revision fixation, debridement of necrotic bone, local graft or scaffold, marrow-derived cell concentrate, and selected growth-factor augmentation rather than relying on one product alone. This framework also explains why some apparently modest biologics generate strong outcomes in expert centers: they are used within a coherent biologic-mechanical plan.

The Masquelet induced-membrane technique provides a related, though slightly different, model of biological augmentation. Alford et al. (2021) described the technique as a two-stage strategy for segmental defects in which a polymethylmethacrylate spacer induces a membrane rich in vascular and osteogenic signalling; in the second stage, the chamber is filled with graft material. Strictly speaking, Masquelet reconstruction is not an injectable orthobiologic, but it is highly relevant to this review because it demonstrates how successful biological enhancement often depends on creating an

environment that protects graft, preserves growth factors, and supports vascularized incorporation. Clinical success in large defects using Masquelet-type methods has reinforced the view that biologic engineering of the local chamber can be as important as the molecular agent itself.

RIA-based graft harvesting also deserves consideration in this context. Landrino et al. (2022) reviewed the RIA system in aseptic femoral nonunions and highlighted its dual value: provision of large volumes of biologically active autologous graft and potential reduction of some limitations associated with traditional iliac crest harvest. RIA graft is particularly useful when more volume is required than iliac crest harvest can comfortably supply. However, it remains an invasive procedure, and its place is closer to advanced autograft biology than to minimally invasive injectable orthobiologics.

The most recent broad systematic evidence continues to support selective optimism rather than universal endorsement. Impieri et al. (2024) concluded that orthobiologics, including PRP, BMPs, and mesenchymal-cell-based strategies, can be effective and safe in delayed union and nonunion of adult long bones, with potential improvements in union rate and healing time. Wang et al. (2025), in a network meta-analysis of delayed union and nonunion interventions, suggested that BMP- and PRP-based approaches may shorten time to union and that PRP/BMAC combinations may be especially promising. Even so, their findings also point to the need for larger head-to-head trials before treatment hierarchies can be considered definitive.

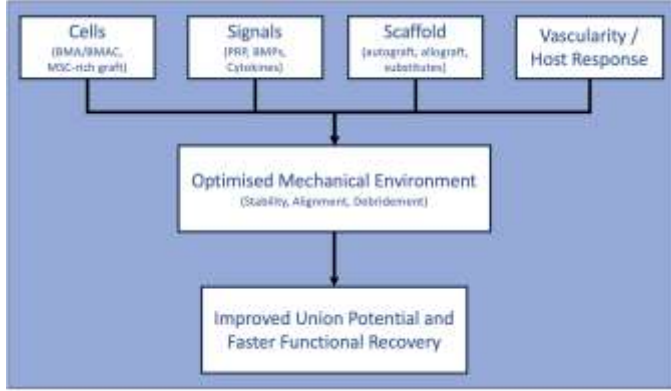
One conclusion emerges consistently across the reviewed studies: biological augmentation rarely compensates for unresolved fundamentals. Where instability persists, infected tissue is inadequately excised, host factors are neglected, or vascularity is profoundly compromised, the benefit of biologic products becomes uncertain. By contrast, when augmentation is applied after meticulous mechanical and biologic problem-solving, outcomes are generally more favorable. This explains why the best-performing literature often comes from revision protocols rather than isolated injections. A practical selection pathway for biologic augmentation is presented in Figure 2.

Table 1 demonstrates that the strongest evidence remains concentrated around autologous grafting and selected BMP use, whereas BMAC and PRP occupy a promising but methodologically less standardized position.

RESULTS

Current evidence supports biological augmentation as a valuable adjunct in bone healing, but not as a universal solution. Autologous bone grafting remains the benchmark against which other strategies are judged, largely because it uniquely combines cells, growth factors, and scaffold (Giannoudis et al., 2005; Calori et al., 2011). BMPs have the strongest randomized evidence in selected indications, especially open tibial fractures, yet practical limitations restrict routine use (Govender et al., 2002; Griffin et al., 2012; Lissenberg-Thunnissen et al., 2011). BMA/BMAC is biologically compelling and clinically promising, particularly in aseptic nonunion, but standardization remains inadequate (Hernigou et al., 2005; Lin et al., 2021; Moyal et al., 2024). PRP is easy to adopt and biologically plausible, but its

fracture-healing evidence is the most inconsistent because formulations and clinical protocols vary so widely (Marx, 2004; Zhang et al., 2021; Van Lieshout et al., 2021; Xu et al., 2022).



influence fracture healing through modulation of osteogenesis, osteoinduction, osteoconduction, and angiogenesis (Einhorn & Gerstenfeld, 2015; Giannoudis et al., 2005). While these mechanisms are conceptually distinct, most

Figure 3. Biological augmentation spectrum in bone healing.

orthobiologic interventions exert overlapping biological effects. Autologous bone grafting remains unique in that it simultaneously provides viable osteogenic cells, an osteoconductive scaffold, and osteoinductive growth factors, thereby fulfilling all essential components of bone regeneration (Giannoudis et al., 2005; Calori et al., 2011). In contrast, other biological modalities tend to target specific aspects of the healing cascade. Bone morphogenetic proteins (BMPs) primarily act as osteoinductive agents by promoting differentiation of mesenchymal stem cells into osteoblasts (Govender et al., 2002; Lissenberg-Thunnissen et al., 2011). Bone marrow aspirate concentrate (BMAC) contributes osteogenic potential through delivery of progenitor cells (Hernigou et al., 2005; Moyal et al., 2024), whereas platelet-rich plasma (PRP) predominantly enhances early inflammatory signaling and angiogenesis through release of cytokines and growth factors (Marx, 2004; Zhang et al., 2021). Angiogenesis has emerged as a critical determinant of successful bone healing. Several studies have demonstrated that inadequate vascularization is strongly associated with nonunion, and interventions that enhance local blood supply tend to show improved outcomes (Einhorn & Gerstenfeld, 2015; Rodham et al., 2023). This is particularly evident in composite biological strategies and membrane-based techniques (Alford et al., 2021; Andrzejowski et al., 2019).

Strategies of biological bone augmentation

1- Autologous Bone Grafting: The Reference Standard

Autologous bone grafting remains the most reliable biological augmentation strategy across all clinical scenarios (Giannoudis et al., 2005; Calori et al., 2011). Its effectiveness is particularly pronounced in cases of atrophic nonunion, segmental defects, and revision surgery (Andrzejowski et al., 2019; Rodham et al., 2023). The ability to provide osteogenic cells, growth factors, and structural support simultaneously explains its continued role as the reference standard. However, donor site morbidity remains a significant limitation. Iliac crest harvesting has been associated with persistent pain, hematoma formation, infection, and functional impairment (Younger & Chapman, 1989; Tonk et al., 2022). These limitations have driven the development of alternative grafting techniques and biological substitutes (de Grado et al., 2018; Landrino et al., 2022). The reamer–irrigator–aspirator (RIA) system has been introduced as a method for harvesting large volumes of biologically active autologous graft material. Clinical evidence suggests that RIA-derived graft may offer comparable osteogenic potential

The benefit is greatest when these adjuncts are used as part of an integrated strategy that also restores stability, vascularity, and local tissue quality (Calori et al., 2011; Rodham et al., 2023). Routine indiscriminate use is not supported by the current literature (Griffin et al., 2012; Wang et al., 2025).

Mechanistic Basis of Biological Augmentation

Biological augmentation strategies

while reducing some of the morbidity associated with iliac crest harvesting (Landrino et al., 2022). Nevertheless, it remains an invasive procedure and is generally reserved for complex reconstructive cases (Andrzejowski et al., 2019; Rodham et al., 2023).

2- Bone Morphogenetic Proteins (BMPs)

BMPs represent one of the most extensively studied orthobiologic interventions with high-level clinical evidence (Govender et al., 2002; Griffin et al., 2012). The randomized controlled trial by Govender et al. (2002) demonstrated improved healing outcomes in open tibial fractures treated with recombinant human BMP-2. Subsequent studies have supported its osteoinductive capacity in selected clinical contexts (Aro et al., 2011; Lissenberg-Thunnissen et al., 2011). Despite these findings, systematic reviews indicate that the benefits of BMPs are not universally reproducible. Griffin et al. (2012) reported that BMPs may reduce complications in specific fracture types but do not justify routine application in all cases. Similarly, Lissenberg-Thunnissen et al. (2011) emphasized that clinical outcomes are highly dependent on dosage, delivery systems, and the biological environment. Additional limitations include high cost, potential inflammatory reactions, heterotopic ossification, and regulatory constraints (Griffin et al., 2012; Rodham et al., 2023). Consequently, BMPs are most appropriately used in carefully selected cases, particularly those characterized by severe osteoinductive deficiency or high risk of nonunion (Govender et al., 2002; Wang et al., 2025).

3- Bone Marrow Aspirate and BMAC: Cell-Based Regeneration

Bone marrow aspirate and its concentrated form, BMAC, have gained considerable attention due to their ability to deliver mesenchymal stem cells and progenitor populations directly to the fracture site (Hernigou et al., 2005; Moyal et al., 2024). The study by Hernigou et al. (2005) demonstrated a significant correlation between the concentration of progenitor cells and successful fracture healing, highlighting the importance of cellular dose. More recent studies have reported favorable outcomes in the treatment of delayed union and nonunion. Union rates exceeding 80% have been described in several cohorts, particularly in aseptic conditions (Moyal et al., 2024; Impieri et al., 2024). Comparative studies suggest that BMAC combined with scaffold materials may achieve outcomes comparable to autologous bone grafting in selected cases (Lin et al., 2021; Mazzotta et al., 2021). However, the heterogeneity of BMAC preparation remains a major limitation. Variability in aspiration techniques, centrifugation protocols, cell concentration, and adjunctive materials complicates interpretation of results and limits reproducibility (Moyal et al., 2024; Hernigou et al., 2005). As such, BMAC is best regarded as a promising adjunct rather than a standardized alternative to autologous grafting (Lin et al., 2021; Impieri et al., 2024).

4- Platelet-Rich Plasma (PRP)

PRP has been widely adopted due to its relative simplicity and biological plausibility (Marx, 2004; Bacevich et al., 2024). It contains a high concentration of growth factors, including platelet-derived growth factor, transforming growth factor-beta, and vascular endothelial growth factor, all of which play key roles in early tissue repair (Marx, 2004; Zhang et al., 2021). Despite strong preclinical evidence, clinical outcomes remain inconsistent. Some studies report reduced time to fracture healing, while others demonstrate no significant improvement compared to standard treatment (Xu et al., 2022; Van Lieshout et al., 2021). Systematic reviews highlight that variability in PRP preparation methods is a major contributing factor to these discrepancies (Zhang et al., 2021; Jamal et al., 2022). Differences in platelet concentration, leukocyte content, activation methods, and delivery techniques make PRP a highly heterogeneous intervention. Consequently, it is difficult to generalize findings across studies (Zhang et al., 2021; Bacevich et al., 2024). Current evidence suggests that PRP is more effective when used as

part of a combined biological strategy rather than as a standalone treatment (Jamal et al., 2022; Wang et al., 2025).

5- Composite and Hybrid Strategies

A consistent finding across the literature is that combined biological approaches tend to produce more reliable outcomes than single-modality interventions (Giannoudis et al., 2007; Andrzejowski et al., 2019). The “diamond concept” framework supports the integration of mechanical stability, cellular components, growth factors, and scaffolding materials in order to optimize bone healing (Giannoudis et al., 2007; Calori et al., 2011). Clinical studies indicate that composite strategies, such as BMAC combined with scaffold materials or PRP used alongside grafting techniques, may enhance healing rates and reduce time to union (Mazzotta et al., 2021; Impieri et al., 2024). These approaches appear particularly beneficial in complex cases where both mechanical and biological deficiencies are present (Andrzejowski et al., 2019; Rodham et al., 2023). One of the most important findings across recent literature is the superiority of combined biological approaches over single-modality interventions. Andrzejowski et al. (2019) demonstrated that multidimensional treatment strategies yield more predictable outcomes in long-bone nonunion.

6- Masquelet Technique

The induced membrane (Masquelet) technique represents a distinct form of biological augmentation that relies on the creation of a biologically active membrane (Alford et al., 2021). This membrane produces growth factors and supports vascularization, thereby facilitating graft incorporation (Alford et al., 2021; Rodham et al., 2023). This technique has demonstrated strong outcomes in the management of critical-sized bone defects (Alford et al., 2021; de Grado et al., 2018). However, it requires a two-stage surgical approach and is associated with longer treatment duration. Despite these limitations, it remains an effective strategy for large bone reconstruction (Alford et al., 2021; Andrzejowski et al., 2019).

Evidence Synthesis and Comparative Effectiveness

Recent systematic reviews and meta-analyses provide further insight into the relative effectiveness of different biological augmentation strategies. Impieri et al. (2024) concluded that orthobiologics can improve union rates and reduce healing time in delayed union and nonunion, although evidence remains heterogeneous. A network meta-analysis by Wang et al. (2025) suggested that BMP-based and PRP-based approaches may reduce time to union in selected cases, while combination strategies involving BMAC may offer additional benefits. However, no single modality has demonstrated clear superiority across all clinical scenarios (Impieri et al., 2024; Wang et al., 2025). Comparative interpretation of current data suggests that BMPs have the strongest evidence base but the narrowest practical indication, autologous grafting remains the most reliable overall, BMAC is promising but methodologically heterogeneous, and PRP currently occupies a more adjunctive than definitive role (Griffin et al., 2012; Moyal et al., 2024; Xu et al., 2022).

Key Determinants of Success

Across all studies, several key factors consistently influence treatment outcomes. Mechanical stability remains the most critical determinant, followed by vascularity, infection control, and patient-related factors such as smoking and metabolic disease (Einhorn & Gerstenfeld, 2015; Bowers et al., 2024). Failure to address these factors significantly reduces the effectiveness of any biological augmentation strategy, regardless of the specific product or technique selected (Giannoudis et al., 2007; Andrzejowski et al., 2019).

Clinical Interpretation and Summary of Findings

The available evidence indicates that biological augmentation can enhance bone healing in selected clinical scenarios, particularly in cases characterized by compromised biological potential (Impieri et al., 2024; Wang et al., 2025). However, its effectiveness is highly dependent on appropriate patient selection, optimization of the mechanical environment, and integration within a comprehensive treatment strategy (Calori et al., 2011; Rodham et al., 2023). No single biological modality has demonstrated universal applicability, and combined approaches appear to offer the most promising results (Andrzejowski et al., 2019; Impieri et al., 2024). Overall, the literature supports the view that biological augmentation improves outcomes in selected patients, does not replace fundamental surgical principles, works best in combination strategies, and should be applied selectively rather than universally (Griffin et al., 2012; Wang et al., 2025).

Modality	Primary biologic role	Typical clinical use	Main advantages	Main limitations
Autologous bone graft	Cells + scaffold + signals	Atrophic nonunion, defects, revision surgery	Strongest overall biologic potency; benchmark comparator	Harvest morbidity, limited volume, longer operative time
RIA-harvested autograft	High-volume autologous graft	Femoral/tibial nonunion, larger defects	Large graft volume, high biologic quality	Specialized equipment, procedural morbidity
BMA/BMAC	Cell-rich augmentation	Aseptic delayed union/nonunion, composite grafting	Minimally invasive relative to structural grafting; biologically versatile	Major variability in cell yield and protocols
PRP / PRF	Growth-factor signalling Table 2. Comparative summary of major biological augmentation strategies	Adjunct in biologically poor fracture environments	Accessible, point-of-care, easy to combine with grafts	Inconsistent clinical evidence; formulation heterogeneity
BMPs	Powerful osteoinduction	Selected open fractures, revision cases, severe biologic deficit	Strongest randomized evidence among commercial biologics	Cost, regulation, adverse-event concerns
Masquelet-type strategy	Biologic chamber + graft protection	Critical-sized defects, staged reconstruction	Useful for large defects; integrates biology with reconstruction	Two-stage treatment, prolonged pathway, technically demanding

DISCUSSION

Biological augmentation represents a promising adjunct in fracture healing; however, its clinical effectiveness remains highly context-dependent. One of the most consistent findings across the literature is that orthobiologic interventions do not compensate for inadequate mechanical stability or poor surgical technique. Instead, they appear to enhance outcomes only when fundamental biomechanical and biological conditions are already optimized (Calori et al., 2011; Rodham et al., 2023).

A major challenge in interpreting current evidence is the heterogeneity of available studies. Variability in PRP preparation, differences in BMAC processing, and inconsistent application protocols significantly limit comparability across studies (Zhang et al., 2021; Moyal et al., 2024). This heterogeneity likely explains the conflicting clinical outcomes reported in the literature, particularly for PRP.

Another key observation is that biological augmentation appears to be most beneficial in biologically compromised environments, such as atrophic nonunion, revision surgery, and critical-sized defects. In contrast, its routine use in uncomplicated fractures is not supported by current evidence (Griffin et al., 2012; Wang et al., 2025).

The growing interest in composite strategies reflects a shift toward a more integrative approach to fracture healing. The diamond concept provides a useful framework for combining biological and mechanical factors, and emerging evidence suggests that such approaches may offer more consistent outcomes than single-modality interventions (Giannoudis et al., 2007; Andrzejowski et al., 2019).

From a clinical perspective, the selection of biological augmentation should be individualized, taking into account fracture characteristics, patient-related risk factors, and resource availability. Cost-effectiveness remains an important consideration, particularly for BMP-based therapies, which, despite strong evidence, are not feasible for routine use in many settings (Griffin et al., 2012). The most defensible conclusion is that biological augmentation does improve outcomes in selected situations: biologically compromised fractures, revision nonunion surgery, segmental defects, and host environments where the biology of union is clearly deficient (Giannoudis et al., 2007; Andrzejowski et al., 2019; Impieri et al., 2024).

CONCLUSION

The central challenge in interpreting the orthobiologic literature is not whether biologic enhancement matters, but which augmentation strategy should be used, for whom, and under what mechanical conditions. This is why the “Does it really improve outcomes?” question cannot be answered with a simple yes or no. Bone healing is a systems problem. The same PRP preparation or BMAC protocol may appear ineffective in one series and useful in another because the surrounding construct, tissue envelope, infection status, and host phenotype differ substantially. Orthopaedic decision-making therefore benefits from moving away from product-centered thinking and toward biologic indication matching.

For clinicians, the most practical framework remains hierarchical. First, determine whether the primary problem is mechanical, biologic, infective, or combined. Second, correct the non-biologic causes of failure. Third, choose augmentation that matches the deficit. For a segmental defect, chamber-based reconstruction with autograft-rich filling may be more rational than isolated PRP. For aseptic atrophic nonunion with limited bone loss, revision stability plus marrow-derived augmentation may be sufficient. For selected open tibial fractures or revision settings with severe osteoinductive deficiency, BMP use may be justified if cost and indication support it. This kind of targeted use is far more consistent with current evidence than blanket orthobiologic adoption.

Another important discussion point is standardization. PRP research has been hindered by inconsistent platelet counts, leukocyte content, activators, carriers, and timing of delivery. BMAC studies vary in aspiration site, concentration device, nucleated cell counts, and scaffold combination. Even “autograft” is not a uniform comparator when sources include iliac crest, local cancellous graft, or RIA-harvested material. Until study protocols report these details consistently, literature synthesis will continue to blur genuinely effective interventions with poorly characterized ones. Better reporting standards are therefore not merely methodological niceties; they are prerequisites for meaningful clinical translation.

Cost-effectiveness is also under-discussed. BMPs may be effective in selected cases, but their expense

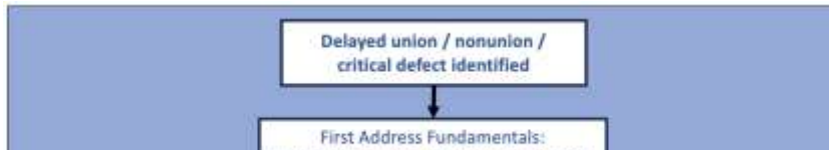
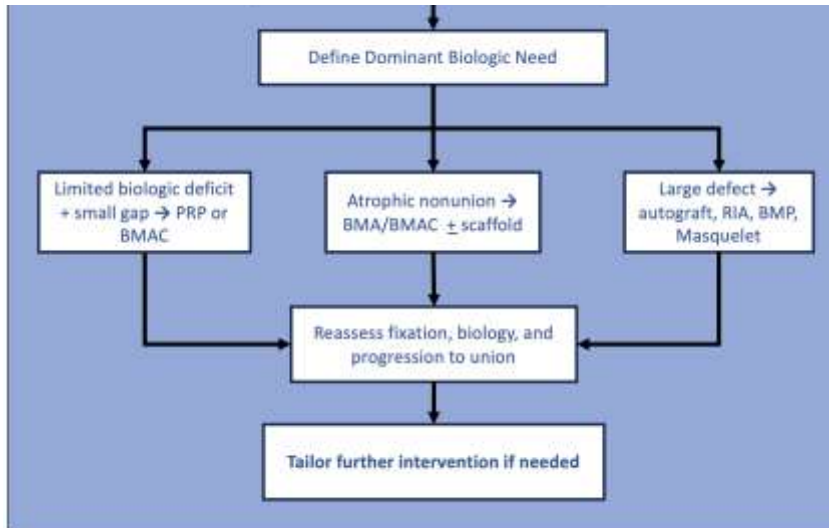


Figure 4. Clinical decision pathway for biological augmentation.



and potential complications have made many units reserve them for difficult revisions or high-risk fractures rather than routine acute care. By contrast, PRP is relatively accessible but may provide less predictable benefit. BMAC often occupies the middle ground, requiring equipment and harvest morbidity but offering a biologically richer product than PRP alone. Future comparative trials should therefore evaluate not only union and time to union, but also reoperation rates, donor-site morbidity,

hospital utilization, and value-based outcomes.

The field is also moving toward combination strategies and phenotype-specific treatment. Emerging studies increasingly assess orthobiologics together rather than in isolation, such as BMAC plus scaffold,

PRP plus graft, or membrane-based techniques plus autologous biologic fillers. This aligns with the diamond concept, which is better suited to real-world reconstructive surgery than the search for one universally superior injectable agent. At the same time, molecular and imaging biomarkers may eventually help identify which patients are most likely to respond to cell-rich versus signal-rich augmentation.

The present review has limitations. It is narrative rather than meta-analytic, and it spans heterogeneous indications ranging from acute open fractures to chronic nonunion and segmental defect reconstruction. However, this breadth reflects the clinical reality of biological augmentation, where interventions are rarely used in one narrowly defined scenario. The purpose of the review is therefore interpretive: to identify where evidence is strongest, where it remains uncertain, and how clinicians can integrate orthobiologics rationally rather than enthusiastically or dismissively.

Overall, the literature supports a balanced position. Biological augmentation is not hype, but neither is it magic. The strongest outcomes occur when biology is enhanced within a disciplined reconstructive plan. Future research should prioritize head-to-head comparative studies, protocol harmonization, cell- and factor-quantification reporting, and indication-specific randomized trials. Until then, the best clinical use of biological augmentation is selective, evidence-aware, and mechanically integrated.

REFERENCES

- 1- Andrzejowski, P., Giannoudis, P. V., & Giannoudis, V. P. (2019). The “diamond concept” for long bone non-union management. *EFORT Open Reviews*, 4(1), 21–29. <https://doi.org/10.1302/2058-5241.4.180056>
- 2- Alford, A. I., Kozloff, K. M., & Hankenson, K. D. (2021). Masquelet’s induced membrane technique: Review of current concepts and future directions. *Journal of Orthopaedic Research*, 39(4), 707–718. <https://doi.org/10.1002/jor.24912>
- 3- Aro, H. T., Govender, S., Patel, A. D., Hernigou, P., Perera de Gregorio, A., Popescu, G. I., et al. (2011). Recombinant human bone morphogenetic protein-2: A randomized trial in open tibial fractures treated with reamed nail fixation. *The Journal of Bone and Joint Surgery. American Volume*, 93(9), 801–808. <https://doi.org/10.2106/JBJS.J.00871>
- 4- Bacevich, B. M., Hall, K. C., Ishmael, C., et al. (2024). Advances with platelet-rich plasma for bone healing. *Biologics: Targets and Therapy*, 18, 1–16. <https://doi.org/10.2147/BTT.SXXXXXX>
- 5- Benshabat, D., Maman, E., Yassin, M., et al. (2021). Addition of bone marrow aspirate concentrate resulted in high rate of healing and good functional outcomes in the treatment of clavicle fracture nonunion. *HSS Journal*, 17(3), 282–289. <https://doi.org/10.1007/s11420-020-09794-4>
- 6- Bowers, K. M., An, T., O’Brien, M. J., & Miclau, T. (2024). Delayed union and nonunion: Current concepts, prevention, and correction. *JBJS Reviews*, 12(6), e23.00192. <https://doi.org/10.2106/JBJS.RVW.23.00192>
- 7- Calori, G. M., Mazza, E., Colombo, M., & Ripamonti, C. (2011). Enhancement of fracture healing with the diamond concept: The role of the biological chamber. *Injury*, 42(11), 1191–1193. <https://doi.org/10.1016/j.injury.2011.10.029>

- 8- de Grado, G. F., Keller, L., Idoux-Gillet, Y., Wagner, Q., Musset, A.-M., Benkirane-Jessel, N., Bornert, F., & Offner, D. (2018). Bone substitutes: A review of their characteristics, clinical use, and perspectives for large bone defects management. *Journal of Tissue Engineering*, 9, 1–18. <https://doi.org/10.1177/2041731418776819>
- 9- Einhorn, T. A., & Gerstenfeld, L. C. (2015). Fracture healing: Mechanisms and interventions. *Nature Reviews Rheumatology*, 11(1), 45–54. <https://doi.org/10.1038/nrrheum.2014.164>
- 10- Filardo, G., Di Matteo, B., Kon, E., Merli, M. L., & Marcacci, M. (2018). Platelet-rich plasma in tendon-related disorders: Results and indications. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, 26(7), 1984–1999. <https://doi.org/10.1007/s00167-018-4860-1>
- 11- Giannoudis, P. V., Einhorn, T. A., & Marsh, D. (2007). Fracture healing: The diamond concept. *Injury*, 38(Suppl 4), S3–S6. [https://doi.org/10.1016/S0020-1383\(08\)70003-2](https://doi.org/10.1016/S0020-1383(08)70003-2)
- 12- Giannoudis, P. V., Dinopoulos, H., & Tsiridis, E. (2005). Bone substitutes: An update. *Injury*, 36(Suppl 3), S20–S27. <https://doi.org/10.1016/j.injury.2005.07.029>
- 13- Govender, S., Csimma, C., Genant, H. K., Valentin-Opran, A., Amit, Y., Arbel, R., et al. (2002). Recombinant human bone morphogenetic protein-2 for treatment of open tibial fractures: A prospective, randomized study of 450 patients. *The Journal of Bone and Joint Surgery. American Volume*, 84(12), 2123–2134. <https://doi.org/10.2106/00004623-200212000-00001>
- 14- Griffin, X. L., Parsons, N., Costa, M. L., & Metcalfe, D. (2012). Bone morphogenetic protein for treating acute fractures and non-unions of the long bones in adults. *Cochrane Database of Systematic Reviews*, 2012(7), CD006950. <https://doi.org/10.1002/14651858.CD006950.pub2>
- 15- Hernigou, P., Mathieu, G., Poignard, A., Manicom, O., Beaujean, F., & Rouard, H. (2005). Percutaneous autologous bone-marrow grafting for nonunions: Influence of the number and concentration of progenitor cells. *The Journal of Bone and Joint Surgery. American Volume*, 87(7), 1430–1437. <https://doi.org/10.2106/JBJS.D.02215>
- 16- Impieri, L., Moretti, L., Vicenti, G., et al. (2024). Orthobiologics in delayed union and non-union of adult long bone fractures: A systematic review. *Injury*, 55(5), 111687. <https://doi.org/10.1016/j.injury.2024.111687>
- 17- Jamal, M. S., Raziq, M. I., Khan, M. A., et al. (2022). The role of platelet-rich plasma and other orthobiologics in bone healing and fracture management: A systematic review. *Journal of Clinical Orthopaedics and Trauma*, 24, 101757. <https://doi.org/10.1016/j.jcot.2022.101757>
- 18- Landrino, M., Ajello, M., Meccariello, L., et al. (2022). The reamer–irrigator–aspirator (RIA) system for the treatment of aseptic femoral nonunions: Report of two cases and literature review. *Medicina*, 58(10), 1422. <https://doi.org/10.3390/medicina58101422>
- 19- Lin, K., Mejia, A., Cheng, A., et al. (2021). Bone marrow aspirate concentrate with cancellous allograft versus iliac crest bone graft in the treatment of long-bone nonunions. *Journal of Orthopaedic Trauma*, 35(9), 469–475. <https://doi.org/10.1097/BOT.0000000000002100>
- 20- Lissenberg-Thunnissen, S. N., de Gorter, D. J. J., Sier, C. F. M., & Schipper, I. B. (2011). Use and efficacy of bone morphogenetic proteins in fracture healing.

- International Orthopaedics*, 35(9), 1271–1280. <https://doi.org/10.1007/s00264-011-1301-1>
- 21- Marx, R. E. (2004). Platelet-rich plasma: Evidence to support its use. *Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, 62(4), 489–496. <https://doi.org/10.1016/j.joms.2003.12.003>
- 22- Mazzotta, A., Stagni, C., Rocchi, M., et al. (2021). Bone marrow aspirate concentrate/platelet-rich fibrin augmentation accelerates healing of aseptic upper limb nonunions. *Journal of Orthopaedics and Traumatology*, 22(1), 21. <https://doi.org/10.1186/s10195-021-00587-9>
- 23- Moyal, A. J., Gardner, W. T., Varacallo, M., et al. (2024). Bone marrow aspirate and bone marrow aspirate concentrate: Does the literature support use in long-bone nonunion and provide new insights into mechanism of action? *Archives of Orthopaedic and Trauma Surgery*, 144, 4337–4350. <https://doi.org/10.1007/s00402-023-05020-0>
- 24- Rodham, P. L., Miska, M., & Giannoudis, P. V. (2023). Biological aspects to enhance fracture healing. *EFORT Open Reviews*, 8(6), 309–321. <https://doi.org/10.1302/2058-5241.8.220115>
- 25- Tonk, G., Toker, S., Aydin, M. K., et al. (2022). Donor site morbidity in autologous bone grafting: A comparison between different techniques of anterior iliac crest bone harvesting. *Journal of Orthopaedics, Trauma and Rehabilitation*, 29, 1–8. <https://doi.org/10.1177/22104917221085678>
- 26- Van Lieshout, E. M. M., El-Menyar, A., Al-Thani, H., & Verhofstad, M. H. J. (2021). Effect of platelet-rich plasma on fracture healing. *Current Osteoporosis Reports*, 19(6), 662–672. <https://doi.org/10.1007/s11914-021-00705-5>
- 27- Wang, X., Zhao, J., Li, Y., et al. (2025). Bone morphogenetic protein, platelet-rich plasma, and bone marrow aspirate concentrate for delayed union and nonunion: A network meta-analysis. *Journal of Orthopaedic Translation*, 49, 100981. <https://doi.org/10.1016/j.jot.2024.100981>
- 28- Xu, Z., Yin, W., Zhang, Y., Qi, X., Chen, Y., & Xie, X. (2022). Efficacy of platelet-rich plasma in the treatment of fractures: A meta-analysis. *Frontiers in Endocrinology*, 13, 820205. <https://doi.org/10.3389/fendo.2022.820205>
- 29- Younger, E. M., & Chapman, M. W. (1989). Morbidity at bone graft donor sites. *Journal of Orthopaedic Trauma*, 3(3), 192–195. <https://doi.org/10.1097/00005131-198909000-00002>
- 30- Zhang, Y., Weng, Y., Chen, J., et al. (2021). Platelet-rich plasma for bone fracture treatment: A systematic review of current evidence in preclinical and clinical studies. *Frontiers in Pharmacology*, 12, 676033. <https://doi.org/10.3389/fphar.2021.676033>

Effects of Inhaler Use on Oral Health and Nutritional Status in COPD and Asthma

Hilal UYSAL¹, Ayşegül OKYAY², Elçin KASAPÖĞLU³

¹E-mail: hilaluysal@gmail.com ; Bartın Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Fakültesi, Hemşirelik Bölümü, Bartın / Türkiye.

²E-mail: okyaay.aysegul.19@gmail.com ; Bartın Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Hemşirelik Bölümü, Bartın / Türkiye.

³E-mail: ekasapoglu@bartin.edu.tr ; Bartın Üniversitesi, Bartın Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu, Sağlık Bakım Hizmetleri Bölümü, Bartın / Türkiye.

Özet

Giriş: İnhaler ilaçlar, ağız sağlığı ve beslenme durumunu etkileyerek yaşam kalitesini olumsuz yönde etkileyebilir. Bu nedenle, inhaler ilaç kullanımının ağız sağlığı ve beslenme üzerindeki etkilerinin araştırılması önemli bir sağlık konusudur.

Amaç: Bu araştırmanın amacı, astım ve KOAH tanılı bireylerde en az üç aydır kullanılan inhaler ilaçların ağız sağlığına ve beslenme durumu üzerindeki etkilerini değerlendirmektir.

Yöntem: Kesitsel ve tanımlayıcı tipteki araştırma, bir devlet hastanesinin göğüs hastalıkları kliniğine başvuran 18 yaş ve üzeri, inhaler tedavi kullanan 200 hasta ile yürütülmüştür. Veriler; Kişisel Bilgi Formu, Oral Mukoz Membran (OMM) Değerlendirme Rehberi ve Mini Nutrisyonel Değerlendirme (MNA) Uzun Formu kullanılarak yüz yüze toplanmıştır.

Bulgular: MM ve MNA toplam puanları arasında negatif ve anlamlı bir ilişki bulunmuştur ($r = -0.193$, $p = 0.006$). Regresyon analizine göre OMM puanı, MNA puanını anlamlı ve negatif yönde etkilemektedir ($B = -0.207$, $p = 0.006$). Model istatistiksel olarak anlamlı olup ($F = 7.642$, $p = 0.006$), açıklayıcılık düzeyi düşüktür ($R^2 = 0.032$).

Sonuç: Bireylerin mukozal bozulma düzeyi arttıkça beslenme durumlarının kötüleştiği bulunmuştur. İnhaler ilaç kullanımının bireylerde ağız sağlığı ve beslenme durumu üzerinde olumsuz etkiler oluşturabileceğini göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: KOAH, astım, inhaler ilaç kullanımı, ağız sağlığı, beslenme durumu

Introduction: Inhaled medications can negatively impact quality of life by affecting

oral health and nutritional status. For this reason, investigating the effects of inhaled medication use on oral health and nutrition is an important health issue.

Objective: The objective of this study is to evaluate the effects of inhaler medications used for

at least three months on oral health and nutritional status in individuals diagnosed with asthma and COPD.

Method: This cross-sectional and descriptive study was conducted with 200 patients aged 18 and older who were using inhaler therapy and had presented to the pulmonary diseases clinic of a state hospital. Data were collected face-to-face using the Personal Information Form, the Oral Mucosal Membrane (OMM) Assessment Guide, and the Mini Nutritional Assessment (MNA) Long Form.

Data were collected face-to-face.

Results: A negative and statistically significant relationship was found between MM and MNA total scores ($r = -0.193$, $p = 0.006$). According to regression analysis, the OMM score significantly and negatively influences the MNA score ($B = -0.207$, $p = 0.006$). The model is statistically significant ($F = 7.642$, $p = 0.006$), but the level of explanatory power is low ($R^2 = 0.032$).

Conclusion: It was found that as the level of mucosal damage increases, individuals' nutritional status deteriorates. The study demonstrated that the use of inhaled

medications may have adverse effects on oral health and nutritional status in individuals.

Keywords: COPD, asthma, use of inhaled medications, oral health, nutritional status

INTRODUCTION

Asthma is a chronic respiratory disease characterized by wheezing, shortness of breath, cough, and a feeling of chest tightness, with symptoms that vary over time. Variable expiratory airflow limitation is the main feature of the disease (TÜSAD, 2020). Chronic Obstructive Pulmonary Disease (COPD) is a disease that develops due to airway and alveolar abnormalities, is generally progressive in course, and is characterized by airway obstruction (GOLD, 2023). Both diseases are important health problems that reduce quality of life and increase mortality (Raheison & Girodet, 2009; Fotokian et al., 2016).

In chronic respiratory diseases, inhaler drug therapy is commonly preferred for symptom control. However, long-term use of these medications, especially those containing corticosteroids, may lead to adverse effects on oral and dental health. Oral candidiasis, dry mouth, mucosal lesions, and taste alterations are among these effects (Godara et al., 2011). This condition may negatively affect food intake and nutritional status by causing problems such as difficulty in chewing and swallowing (Karaoğlu & Kocabaş, 2019).

Considering the strong relationship between oral health and general health, it is important to evaluate the effects of inhaler drug use on oral mucosa and nutritional status together. However, there are limited studies in the literature that address these three factors together.

In this study, it was aimed to examine the effects of inhaler drug use on oral health and nutritional status in patients diagnosed with COPD and asthma.

METHOD

Data in the study were collected using the Personal Information Form, the Oral Mucous Membrane Integrity Assessment Guide and Monitoring Form, and the Mini Nutritional Assessment (MNA) Long Form. The Personal Information Form includes the demographic and disease-related characteristics of the participants. The Oral Mucosal Assessment Guide is a scale that evaluates oral health under eight headings and in which higher scores indicate poorer condition (Cronbach's $\alpha = 0.748$). The MNA is a tool that assesses the nutritional status of individuals and classifies the level of malnutrition (Cronbach's $\alpha = 0.755$).

Ethics committee approval and institutional permissions were obtained for the study, informed consent was obtained from the participants, and the study was conducted in accordance with the Declaration of Helsinki.

The data were analyzed using SPSS 22.0 software. Descriptive statistics, independent samples t-test, ANOVA, and Pearson correlation analyses were used. Since the variables were determined to have a normal distribution, parametric tests were preferred.

RESULTS

Sixty percent of the participants were male, and 12.5% were active smokers. A considerable proportion of the individuals were overweight or obese, and 33.5% experienced weight loss. Most of the participants had been using inhaler medications for a long time, and 55% reported problems related to inhaler use. The most common side effects were dry mouth, aphthous ulcers, and taste alterations. In contrast, the proportion of those who performed oral care after inhaler use was quite low.

In the study, the mean MNA score of the individuals was 23.17 ± 4.13 , and they were generally found to be at risk of malnutrition. Malnutrition or risk of malnutrition was present in 39.5% of the participants. The mean Oral Mucous Membrane (OMM) score was 13.34 ± 3.85 , indicating a moderate level of impairment in mucosal integrity.

A negative and significant relationship was found between OMM and MNA scores ($r = -0.193$, $p = 0.006$). According to regression analysis, oral mucous membrane integrity had a significant but low-level effect on nutritional status ($R^2 = 0.032$). It was determined that as mucosal deterioration increased, nutritional status worsened.

When MNA scores were examined according to demographic variables, it was found that married individuals had better nutritional status, and low BMI and weight loss increased the

risk of malnutrition ($p < 0.001$). In terms of OMM scores, no significant difference was found according to demographic variables.

CONCLUSION AND DISCUSSION

In this study, it was determined that inhaler medication use has significant effects on oral health and nutritional status in individuals diagnosed with COPD and asthma. It was found that 55% of the participants experienced oral problems, with the most common findings being dry mouth, aphthous ulcers, and taste alterations. These findings are consistent with Matera et al. (2015), who reported that inhaled corticosteroids weaken the mucosal barrier and increase the risk of local infection, and with Gani et al. (2022), who emphasized that they reduce salivary flow and negatively affect oral health. In addition, the low level of oral hygiene after inhaler use (10%) is in line with inadequate oral care habits reported in the literature (Ayinampudi et al., 2016).

In the oral mucous membrane evaluation, 28.5% of individuals were classified in the moderate and high-risk groups, indicating that inhaler use may have adverse effects on mucosal integrity. One of the important findings of the study is the presence of a negative and significant relationship between OMM and MNA scores. This indicates that as mucosal deterioration increases, nutritional status worsens. It has also been reported in the literature that oral pain, dryness, and difficulty in swallowing limit food intake and increase the risk of malnutrition (Kim et al., 2022). Previous studies have consistently demonstrated a significant association between poor oral health and malnutrition. Impaired oral conditions, including mucosal lesions, tooth loss, and chewing difficulties, have been associated with lower Mini Nutritional Assessment (MNA) scores, indicating deterioration in nutritional status (Algra et al., 2021; Sittichoktrakul et al., 2021; Khoury et al., 2022; Kim et al., 2026).

The fact that approximately 40% of the participants were in the malnutrition risk or malnutrition group indicates that nutritional problems are common in chronic respiratory diseases. Hsu et al. (2014) reported that low MNA scores are associated with respiratory functions, while Yuan et al. (2023) reported that malnutrition negatively affects disease prognosis.

This study demonstrated that inhaler medication use has significant effects on oral health and nutritional status in individuals diagnosed with COPD and asthma. Oral problems such as dry mouth, aphthous ulcers, and taste alterations were observed in more than half of the participants, and 28.5% were found to be at risk in terms of oral mucous membrane condition. A negative and significant relationship was identified between oral mucosal deterioration and nutritional status, indicating that as mucosal integrity decreases, nutritional status worsens. In addition, the finding that approximately 40% of individuals are at risk of malnutrition highlights the importance of monitoring nutritional status in this patient group.

In conclusion, it is necessary to ensure oral hygiene, perform regular oral health assessments, and monitor nutritional status in individuals using inhalers. A multidisciplinary approach and patient education are particularly important in high-risk groups.

REFERENCE

- Algra, Y., Haverkort, E., Kok, W., van Etten-Jamaludin, F., van Schoot, L., Hollaar, V., Naumann, E., de van der Schueren, M., & Jerković-Ćosić, K. (2021).** The association between malnutrition and oral health in older people: A systematic review. *Nutrients*, 13(10), 3584. <https://doi.org/10.3390/nu13103584>
- Ayinampudi, B. K., Gannepalli, A., & Pachava, V. B. (2016). Association between oral manifestations and inhaler use in asthmatic and chronic obstructive pulmonary disease patients. *Journal of Dr. NTR University of Health Sciences*, 5(2), 96–101. <https://doi.org/10.4103/2277-8632.178950>
- Fotokian, Z., Mohammadi Shahboulaghi, F., Fallahi-Khoshknab, M., & Pourhabib, A. (2016). Quality of life of people with chronic obstructive pulmonary disease. *International Journal of Community Based Nursing and Midwifery*, 4(1), 74–85. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0174028>
- Gani, F., Caminati, M., Bellavia, F., Baroso, A., Faccioni, P., Pancera, P., Batani, V., & Senna, G. (2020). Astımlı hastalarda ağız sağlığı: Bir derleme. *Clinical and Molecular Allergy*, 18(1), 22. <https://doi.org/10.1186/s12948-020-00137-2>
- Godara, N., Godara, R., & Khullar, M. (2011). Impact of inhalation therapy on oral health. *Lung India*, 28(4), 272–275. <https://doi.org/10.4103/0970-2113.85689>
- Global Initiative for Chronic Obstructive Lung Disease. (2023). *Global strategy for the prevention, diagnosis and management of chronic obstructive pulmonary disease*. <https://goldcopd.org>
- Hsu, M. F., Ho, S. C., Kuo, H. P., Wang, J. Y., & Tsai, A. C. (2014). Mini-Nutritional Assessment (MNA) is useful for assessing the nutritional status of patients with chronic obstructive pulmonary disease: A cross-sectional study. *COPD: Journal of Chronic Obstructive Pulmonary Disease*, 11(3), 276–282. <https://doi.org/10.3109/15412555.2013.863274>
- Karaoğlu, L., & Kocabaş, A. (2019). Assessment of nutritional status in children with asthma. *Journal of Child Health and Diseases*, 62(1), 1–8.
- Khoury, C., Samot, J., Helmer, C., Rosa, R. W., Georget, A., Dartigues, J.-F., & Arrivé, E. (2022).** The association between oral health and nutritional status in older adults: A cross-sectional study. *BMC Geriatrics*, 22(1). <https://doi.org/10.1186/s12877-022-03133-0>
- Kim, H. N., Park, H., Cha, J. M., Lim, J., Suh, H., Jung, H., & Lim, H. S. (2026). Associations among oral health, nutritional status, and care dependency in Korean long-term care facilities. *Clinical Interventions in Aging*, 21, 559701. <https://doi.org/10.2147/CIA.S559701>

Matera, M. G., Cardaci, V., Cazzola, M., & Rogliani, P. (2015). Safety of inhaled corticosteroids for treating chronic obstructive pulmonary disease. *Expert Opinion on Drug Safety*, 14(3), 505–513. <https://doi.org/10.1517/14740338.2015.1001363>

Raherison, C., & Girodet, P. O. (2009). Epidemiology of COPD. *European Respiratory Review*, 18(114), 213–221. <https://doi.org/10.1183/09059180.00003609>

Sittichoktrakul, P., Kiattavorncharoen, S., Arayasantiparb, R., & Okuma, N. (2021). Oral health condition of older adults with different nutritional status in Chamni District, Buriram Province. *Khon Kaen Dental Journal*, 24(3), 38–47.

Türkiye Solunum Araştırmaları Derneği (TÜSAD). (2020). *Astım tanı ve tedavi rehberi*. <https://www.solunum.org.tr>

Yuan, F. Z., Xing, Y. L., Xie, L. J., Yang, D. L., Shui, W., Niu, Y. Y., Zhang, X., & Zhang, C. R. (2023). The relationship between prognostic nutritional indexes and the clinical outcomes of patients with acute exacerbation of chronic obstructive pulmonary disease. *International Journal of Chronic Obstructive Pulmonary Disease*, 18, 1155–1167. <https://doi.org/10.2147/COPD.S402717>

The Relationship Between the Care Burden of Families of Intensive Care Patients in Need of Palliative Care and Sociodemographic Factors

Elçin Sebahat KASAPOĞLU ¹, Funda ÇAKIR ², Hilal UYSAL ³

¹E-mail: ekasapoglu@bartin.edu.tr; Bartın Üniversitesi, Bartın Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu, Sağlık Bakım Hizmetleri Bölümü, Bartın / Türkiye.

²E-mail: fundaucar433@gmail.com ; Bartın Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Hemşirelik Bölümü, Bartın / Türkiye.

³E-mail: hilaluysal@gmail.com; Bartın Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Fakültesi, Hemşirelik Bölümü, Bartın / Türkiye.

Özet

Giriş: Yoğun bakım üniteleri kritik bakımın uygulandığı, kaynakları sınırlı olan, maliyeti yüksek alanlardır. Bu nedenle yoğun bakımlarda, palyatif bakım hastası insidansı azaltılmalıdır.

Amaç: Çalışmamız yoğun bakım ünitelerinde tedavi gören palyatif bakım hastalarının klinik özelliklerinin ve bu hastalara bakım verenlerin sosyo-demografik durumlarının, aile bakım yükü ile ilişkisini değerlendirmek amacıyla yapılmıştır.

Yöntem: Örneklem büyüklüğü 181 olup, tanımlayıcı ve kesitsel tiptedir. Veriler; hasta/hasta yakını bilgi formu, Palyatif Performans Skalası (PPS) ve Aile Üyeleri Tarafından Verilen Bakımı Değerlendirme Envanteri ile yüz yüze toplanmıştır.

Bulgular: Kadın bakım verenlerin bilgi düzeyi puanları erkeklerden anlamlı derecede yüksek bulunmuştur ($p=,008$). Eğitim düzeyi arttıkça bakımda yaşanan güçlüklerin azaldığı ($p=,028$), düşük gelirli bakım verenlerin bakım kaynakları puanlarının ise daha yüksek olduğu belirlenmiştir ($p=,050$).

Sonuç: Yoğun bakım hastalarının önemli bir kısmının palyatif bakım ihtiyacı olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle palyatif bakım hizmetlerinin geliştirilmesi, yoğun bakım-palyatif bakım entegrasyonu sağlanması, bakım verenlere bakım yükünü hafifletmek adına eğitimlerin verilmesi, psikososyal destek programlarının hazırlanması, maddi destek sağlanması gerektiği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Bakım veren yükü, palyatif bakım, yaşam kalitesi, yoğun bakım

Abstract

Introduction: Intensive care units are high-cost settings with limited resources where critical care is provided. For this reason, the incidence of palliative care patients in intensive care units should be reduced.

Objective: Our study was conducted to evaluate the relationship between the clinical characteristics of palliative care patients receiving treatment in intensive care units and the sociodemographic profiles of their caregivers, as well as the family care burden.

Method: The sample size was 181, and the study was descriptive and cross-sectional in nature. Data were collected face-to-face using a patient/family member information form, the Palliative Performance Scale (PPS), and the Family Caregiver Assessment Inventory.

Results: Female caregivers' knowledge level scores were found to be significantly higher than those of males ($p=0.008$). It was determined that difficulties in care decreased as educational level increased ($p=0.028$), while caregivers with lower incomes had higher scores on care resources ($p=0.050$).

Conclusion: It was determined that a significant proportion of intensive care patients have a need for palliative care. Therefore, it was concluded that palliative care services must be developed, integration between intensive care and palliative care must be ensured, training must be provided to caregivers to alleviate their care burden, psychosocial support programs must be established, and financial support must be provided.

Keywords: Caregiver burden, intensive care unit, palliative care, quality of life

INTRODUCTION

Palliative care focuses on both the patient and the family by reducing pain and suffering and improving quality of life. In intensive care, however, patients receive life-sustaining treatments. The implementation of palliative care in intensive care units is an issue that warrants consideration (Mercadante, Gregoretti, & Cortegiani, 2018). In a study conducted in Japan, only 4% of ICU physicians reported conducting palliative care screenings, 31% stated there was no clear method to identify patients in need of palliative care, and 54% indicated they lacked sufficient knowledge of standard protocols; therefore, it is recommended that ICU physicians receive training in palliative care (Igarashi et al., 2022). In Turkey, most ICU patients are 65 years of age or older, with a median age of 69. Factors such as the prevalence of chronic diseases, an increase in cases of malignancy, and a growing number of patients requiring long-term care are associated with this rising average age (Parpucu et al., 2024). Due to the growing elderly population, there is an increasing need for clinicians trained in geriatrics (Brunker, Boncyk, Rengel & Hughes, 2023). Studies indicate that the inappropriate use of ICUs is a significant global problem. Intensive care specialists estimate that approximately 20% of ICU patients receive unnecessary treatment (Damps et al., 2022). Healthcare workers believe this should not be the case (Yıldırım, Işık & Yalcin, 2023). The European Society of Intensive Care Medicine emphasizes the need for the early integration of palliative care (Kesecioglu et al., 2024). However, palliative care in low- and middle-income countries has not been extensively studied. To achieve optimal outcomes, there is a need for research focused on intensive care needs in low- and middle-income countries (Rao et al., 2022). A study conducted in Turkey also indicates that terminally ill patients should be admitted to palliative care units, while intensive care beds should be reserved for patients with a chance of recovery (Sungurtekin & Yalçın, 2023). Family education plays a significant role in preventing unnecessary hospitalizations. Factors such as the caregiver's age, gender, education, beliefs, and relationship with the patient also influence the challenges of caregiving. Older patients have greater self-care needs, which increases anxiety and depression for both patients and their families (Soydan et al., 2023). Due to the challenges

experienced during the caregiving process, negative outcomes may arise for caregivers, and research highlighting these outcomes has introduced the concept of “burden.” In the literature, the concept of burden is defined as the negative consequences experienced by caregivers during the caregiving process, including psychological problems, health issues, financial difficulties, social problems, family relationship issues, and a sense of losing control. (Yıldız, Dedeli, & Çınar Pakyüz, 2016). Identifying the care burden on the family or close relatives and addressing the needs of both the family and the care recipient accordingly will improve the quality of life for both parties. (Pollock & Seymour, 2018). It is necessary to increase the number of palliative care services, provide care that alleviates the patient’s discomfort, lightens the family’s burden, and maintains communication between the family and the patient, as well as to develop home health services, increase financial assistance, and ensure easy access to healthcare. Palliative care services can be provided through hospital-based, home-based, and community-based approaches (Erol & Ergün, 2019). Therefore, the aim of this study was to investigate the care burden experienced by the families of palliative care patients in the intensive care unit and the factors influencing it.

METHODS

This is a descriptive, cross-sectional, and exploratory study. The sample size was calculated using the Cochran formula, assuming a 95% confidence level and a 5% margin of error, and the study was conducted by randomly selecting 181 caregivers. After the sample size was determined, data were collected by the researchers from the caregivers of ICU patients.

Data Collection Tools:

Patient Information Form: The questionnaire, developed by the researchers, includes questions regarding the sociodemographic characteristics of patients in the adult intensive care unit, as well as their physiological parameters.

Family Member Information Form: The questionnaire, developed by the researchers, includes the family members’ sociodemographic characteristics and their degree of closeness to the patient.

Palliative Performance Scale (PPS): The patient’s current condition is assessed in terms of mobility, daily activities, independence, nutritional status, and level of consciousness. By referring to the scale’s table, a combination of these five criteria is made for each row. The patient’s lowest-scoring area is the determining factor (Anderson et al., 1996; Oğuz et al., 2001).

Family-Provided Care Assessment Inventory Scale: The items in the scale are grouped into 4 subscales, and each subscale has its own score (Cingil & Gözü, 2008; Shyu, 2000).

Data analysis: The data were analyzed using the SPSS software package. Continuous variables are presented as mean, standard deviation, minimum, and maximum; categorical variables are presented as frequency and percentage. The reliability of the scales was assessed using Cronbach’s Alpha. Relationships between the Palliative Care Performance Scale and clinical variables were examined using Pearson correlation analysis. For between-group comparisons, ANOVA was used when normal distribution was met, and the Kruskal-Wallis H test was used when it was not. Findings were evaluated at a 95% confidence interval and a significance level of $p < 0.05$.

Ethical Aspects of the Study: All methods of this study were conducted in accordance with the Declaration of Helsinki, and permission was obtained from the Ethics Committee of Social and Humanities Sciences at a university (Protocol No.: 2024-SBB-0613). Prior to data collection, the researchers obtained informed consent from patients and caregivers who agreed to participate in the study.

RESULTS

Of the caregivers participating in the study, 58% were women and 42% were men, with an average age of 48.20 ± 11.86 . The most common level of education was elementary school (43.6%), followed by high school (19.3%) and college (18.2%). 47% of participants were unemployed, 32.6% were employed, and 20.4% were retired. Income level was predominantly reported as middle-income (89%). Most caregivers were first-degree relatives (59.7%).

When analyzed by gender, statistically significant differences were found in the “Caregiver’s Knowledge Level Regarding the Person Receiving Care” scores, with female caregivers demonstrating significantly higher knowledge levels ($p = 0.008$).

When comparing the difficulties experienced in providing care based on participants’ educational levels, their scores showed a statistically significant difference ($p = 0.028$). A multiple comparison test was conducted to identify the groups showing differences, and it was found that those with a university education had lower scores compared to those with an elementary school education or lower. When the scores for the “Care-Giving Resources” item were examined according to participants’ income status, a statistically significant difference was found, and it was determined that participants in the low-income group had higher scores than those in the middle- and high-income groups ($p = 0.050$).

While 96.7% of ICU patients did not require mechanical ventilation, 3.3% did. When participants’ palliative care needs were categorized, it was found that 23.2% required intensive care, 56.9% required moderate care, and 19.9% required care. A significant, negative correlation was found between the Palliative Performance Scale and the SOFA score ($r = -0.298$; $p < 0.001$), APACHE ($r = -0.579$; $p < 0.001$), and the expected mortality rate ($r = -0.474$; $p < 0.001$).

CONCLUSIONS AND DISCUSSION

This study examined the impact of palliative care patients receiving treatment in the intensive care unit on the caregiving burden of their families. The literature indicates that caregivers are predominantly women and are typically between the ages of 48 and 51 (Fellia et al., 2023; Guerra-Martín et al., 2023). When examining the degree of kinship among caregivers, it was found that approximately 60% were mothers, fathers, or siblings. A review of the literature indicates that medication adherence management is better among patients whose caregivers are women and first-degree relatives (Muñoz-Contreras et al., 2022). It is important to recognize the significance of family support, and particular attention should be paid to the needs of caregivers of palliative care patients. Nearly all ICU patients included in the study did not require mechanical ventilation. According to the scale, 47.5% of ICU patients scored 50 or higher. This indicates that a significant proportion of hospitalized patients are palliative care patients. This is one of the factors highlighting the need to integrate palliative care. Another finding is that caregivers report an increase in the care burden for ICU patients after discharge compared to previous levels (Tejero-Aranguren et al., 2024). In another study,

it was observed and demonstrated that as caregivers' readiness for care increased, their burden decreased. Therefore, it is important for nurses to plan nursing interventions by considering the factors that influence caregivers' burden in palliative care (Karabulutlu, Turan & Yanmış, 2022). The study also examined the relationship between the sociodemographic characteristics of individuals providing care to palliative care patients hospitalized at YBU and their care burdens. The fact that female caregivers had a higher level of knowledge about the patients they cared for compared to male caregivers indicated that gender is a determining factor. This may be an indication of a situation related to established gender roles in Turkey and in the literature. Additionally, it was found that as educational level increased, caregivers experienced fewer difficulties in providing care. This suggests that educational level serves as an indicator of awareness during the care process. On the other hand, the fact that caregivers with lower incomes scored higher on measures of care resources indicates that caregivers in this group either seek more support during the care process or assume greater individual responsibility. If the family is included in palliative care, the number of palliative care patients admitted to the ICU can be reduced. Even if the patient is admitted to the ICU, if the caregiver receives training in palliative care, unnecessary subsequent ICU admissions can be prevented. The study discussed, supported by evidence, the importance of designing interventions to reduce the caregiver's burden by considering not only the patient's clinical findings but also the caregivers' needs and sociodemographic characteristics.

This study demonstrates that a significant proportion of intensive care patients require palliative care. It has been found that the sociodemographic characteristics of caregivers—such as gender, education, and income—influence their care burden when providing care to intensive care patients in need of palliative care. The findings of the study indicate that palliative care services for patients in the ICU need to be developed, and that there is a need for the integration of intensive care and palliative care in Turkey. It also highlights the necessity of planning educational and psychosocial support programs for caregivers.

KAYNAKÇA

Anderson, F., Downing, G. M., Hill, J., Casorso, L., & Lerch, N. (1996). Palliative performance scale (PPS): A new tool. *Journal of Palliative Care*, 12(1), 5–11.
<https://doi.org/10.1177/082585979601200102>

Brunker, L. B., Boncyk, C. S., Rengel, K. F., & Hughes, C. G. (2023). Elderly patients and management in intensive care units (ICU): Clinical challenges. *Clinical Interventions in Aging*, 18, 93–112.
<https://doi.org/10.2147/CIA.S365968>

Cingil, D., & Gözümlü, S. (2008). Yaşlı bireyler için aile üyeleri tarafından verilen bakımı değerlendirme envanterinin geçerlilik ve güvenilirliği.

Damps, M., Gajda, M., Stołtny, L., Kowalska, M., & Kuciewicz-Czech, E. (2022). Limiting futile therapy as part of end-of-life care in intensive care units. *Anaesthesiology Intensive Therapy*, 54(3), 279–284. <https://doi.org/10.5114/AIT.2022.119124>

Erol, S., & Ergün, A. (2019). Geriatrik palyatif bakım: Neden, nerede, ne zaman, nasıl ve kim tarafından verilmeli. Erişim adresi: <https://consultgeri.org/geriatric-topics/palliative-care>

- Fellia, T., Sarafis, P., Bouletis, A., et al. (2023). Correlation of cancer caregiver's burden, stress, and their quality of life. *Advances in Experimental Medicine and Biology*, 1425, 267–273. https://doi.org/10.1007/978-3-031-31986-0_25
- Guerra-Martín, M. D., Casado-Espinosa, M. D. R., Gavira-López, Y., Holgado-Castro, C., López-Latorre, I., & Borrallo-Riego, Á. (2023). Quality of life in caregivers of cancer patients: A literature review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(2), 1570. <https://doi.org/10.3390/ijerph20021570>
- Igarashi, Y., Tanaka, Y., Ito, K., et al. (2022). Current status of palliative care delivery and self-reported practice in ICUs in Japan: A nationwide cross-sectional survey of physician directors. *Journal of Intensive Care*, 10(1). <https://doi.org/10.1186/s40560-022-00605-8>
- Karabulutlu, E. Y., Turan, G. B., & Yanmış, S. (2022). Evaluation of care burden and preparedness of caregivers who provide care to palliative care patients. *Palliative and Supportive Care*, 20(1), 30–37. <https://doi.org/10.1017/s1478951521000213>
- Kesecioglu, J., Rusinova, K., Alampi, D., et al. (2024). European Society of Intensive Care Medicine guidelines on end of life and palliative care in the intensive care unit. *Intensive Care Medicine*, 50(11), 1740–1766. <https://doi.org/10.1007/s00134-024-07579-1>
- Mercadante, S., Gregoretti, C., & Cortegiani, A. (2018). Palliative care in intensive care units: Why, where, what, who, when, how. *BMC Anesthesiology*, 18(1). <https://doi.org/10.1186/s12871-018-0574-9>
- Muñoz-Contreras, M. C., Segarra, I., López-Román, F. J., Galera, R. N., & Cerdá, B. (2022). Role of caregivers on medication adherence management in polymedicated patients with Alzheimer's disease or other types of dementia. *Frontiers in Public Health*, 10, 987936. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2022.987936>
- Oğuz, G., Şenel, G., Koçak, N., & Karaca, Ş. (2001). Palyatif performans skalası-Türkçe (PPSv2). Erişim adresi: www.victoriahospice.org
- Parpucu, Ü. M., Küçük, O., & Aydemir, S. (2024). Factors influencing morbidity and mortality rates in tertiary intensive care units in Turkey: A retrospective cross-sectional study. *Healthcare*, 12(6). <https://doi.org/10.3390/healthcare12060689>
- Pollock, K., & Seymour, J. (2018). Reappraising “the good death” for populations in the age of ageing. *Age and Ageing*, 47(3), 328–330. <https://doi.org/10.1093/ageing/afy008>
- Rao, S. R., Salins, N., Joshi, U., et al. (2022). Palliative and end-of-life care in intensive care units in low- and middle-income countries: A systematically constructed scoping review. *Journal of Critical Care*, 71, 154115. <https://doi.org/10.1016/j.jcrc.2022.154115>
- Shyu, Y. I. L. (2000). Development and testing of the family caregiving factors inventory (FCFI) for home health assessment in Taiwan. *Journal of Advanced Nursing*, 32(1), 226–234. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2648.2000.01462.x>

- Soydan, A. M., Elkin, N., Barut Bakım, A. Y., et al. (2023). Bakım yükünün yaşlı bakıma etkileri. *İstanbul Gelişim Üniversitesi Sağlık Bilimleri Dergisi*, 20(20), 703–713. <https://doi.org/10.38079/igusabder.1130737>
- Sungurtekin, H., & Yalçın, S. (2023). Evaluation of the end-stage patients in intensive care. *Turkish Journal of Intensive Care*, 21(4), 248–253. <https://doi.org/10.4274/tybd.galenos.2022.35219>
- Tejero-Aranguren, J., García del Moral, R., Poyatos-Aguilera, M. E., & Colmenero, M. (2024). Family burden after critical illness: The forgotten caregivers. *Medicina Intensiva*, 48(2), 69–76. <https://doi.org/10.1016/j.medine.2023.08.002>
- Yildirim, G., Işık, M. T., & Yalcin, S. O. (2023). Relationship between physician's and nurses' attitudes towards futile treatment and their approach to death and terminally ill patients. *Omega (Westport)*, 91(3), 1348–1367. <https://doi.org/10.1177/00302228231153712>
- Yıldız, E., Dedeli, Ö., & Çınar Pakyüz, S. (2016). Evaluation of care burden and quality of life among family caregivers of patients with cancer. *Journal of Education and Research in Nursing*, 13(3), 216–225. <https://doi.org/10.5222/head.2016.216>

Investigation of Perceived Usability and Satisfaction with a Robotic Gait Assist Device in Neurological Patients

Osman ÇOBAN¹, Ayşe Nur ŞEKEROĞLU²

¹E-mail: osman.coban@uskudar.edu.tr; Üsküdar University, Faculty of Health Sciences, Department of Physiotherapy and Rehabilitation, İstanbul / Türkiye.

ORCID: 0000 0003 4493 2478

²E-mail: aysenurvural@osmaniye.edu.tr; Osmaniye Korkut Ata University, Vocational School of Health Services, Department of Therapy and Rehabilitation Osmaniye / Türkiye.

ORCID: 000 0002 9726 3944

Özet

Amaç: Bu çalışma, nörolojik bozuklukları olan bireylerde robotik yürüme destek cihazlarının kullanılabilirliğini ve memnuniyetini değerlendirmeyi ve bunların klinik özelliklerle ilişkisini incelemeyi amaçlamıştır. **Yöntemler:** Bu kesitsel çalışmaya çeşitli nörolojik rahatsızlıkları olan 22 katılımcı dahil edilmiştir. Kullanılabilirlik, Kullanışlılık, Memnuniyet ve Kullanım Kolaylığı (USE) Anketi kullanılarak değerlendirilirken, fonksiyonel yürüme ve spastisite, Fonksiyonel Yürüme Ölçeği (FAS) ve Modifiye Ashworth Ölçeği (MAS) ile değerlendirilmiştir. İstatistiksel analiz, tanımlayıcı yöntemler, iç tutarlılık, Spearman korelasyonu ve grup karşılaştırmalarını içermiştir. **Sonuçlar:** Katılımcılar genel olarak olumlu kullanılabilirlik bildirmiş ve öğrenme kolaylığında daha yüksek puanlar elde etmişlerdir. USE anketi yüksek iç tutarlılık göstermiştir (Cronbach'ın $\alpha = 0,89$). USE alt ölçekleri arasında güçlü pozitif korelasyonlar bulunmuştur ($r = 0,816-0,923$, $p < 0,05$). Toplam USE puanları ile FAS, MAS veya cihaz kullanım süresi arasında anlamlı bir ilişki gözlenmemiştir. Kullanılabilirlik puanları taniya veya önceki robotik rehabilitasyon deneyimine göre de farklılık göstermedi ($p > 0,05$). **Sonuç:** Robotik yürüyüş destek cihazları, klinik özelliklerden bağımsız olarak yüksek kullanılabilirlik sergiledi. Bu bulgular, bu tür sistemlerin kullanıcı dostu olduğunu ve farklı nörolojik popülasyonlarda uygulanabilir olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Robotik, rehabilitasyon, hasta memnuniyeti, kullanılabilirlik, nörolojik rehabilitasyon

Abstract

Aim: This study aimed to evaluate the usability and satisfaction of robotic gait assist devices in individuals with neurological disorders and to examine their relationship with clinical characteristics. **Methods:** This cross-sectional study included 22 participants with various neurological conditions. Usability was assessed using the Usefulness, Satisfaction, and Ease of Use (USE) Questionnaire, while functional ambulation and spasticity were evaluated with the Functional Ambulation Scale (FAS) and Modified Ashworth Scale (MAS). Statistical analysis included descriptive methods, internal consistency, Spearman correlation, and group comparisons. **Results:** Participants reported generally positive usability, with higher scores in ease of learning. The USE questionnaire showed high internal consistency (Cronbach's $\alpha = 0.89$). Strong positive correlations were found among USE

subscales ($r = 0.816-0.923$, $p < 0.05$). No significant associations were observed between total USE scores and FAS, MAS, or device usage duration. Usability scores also did not differ by diagnosis or prior robotic rehabilitation experience ($p > 0.05$). **Conclusion:** Robotic gait assist devices demonstrated high usability independent of clinical characteristics. These findings suggest that such systems are user-friendly and applicable across different neurological populations.

Keywords: Robotics, rehabilitation, patient satisfaction, usability, neurological rehabilitation

INTRODUCTION

Stroke is one of the leading causes of long-term disability in adults, and gait disturbance is a primary component of functional limitations following stroke. Regaining the ability to walk is among the fundamental goals of rehabilitation in terms of level of independence and quality of life. It has been reported that high-repetition, task-specific, and intensive training supports motor learning and improves functional outcomes in the recovery of walking function following a stroke (Jørgensen et al., 1995; French et al., 2009). In this context, robotic gait devices have been widely used in stroke rehabilitation in recent years due to their advantages, such as providing standardized and repetitive step training, increasing treatment intensity, and reducing the physical burden on the therapist. Systematic reviews and meta-analyses indicate that robot-assisted gait training, when combined with conventional rehabilitation, can produce positive effects on walking speed, functional mobility, and lower extremity function (Belda-Lois et al., 2011; Bruni et al., 2018; Leow et al., 2023). However, in addition to the clinical efficacy of robotic systems, the usability and satisfaction levels perceived by patients are also important for the sustainable use of these technologies in clinical settings. Indeed, studies have shown that stroke patients generally find robotic exoskeleton-based gait training to be beneficial and motivating, but that the device's ease of use, learnability, and comfort can influence the patient experience (Vaughan-Graham et al., 2020; Louie et al., 2022; McDonald et al., 2022). Evaluating perceived usability alongside user satisfaction in stroke patients using robotic walking devices is essential for understanding the clinical applicability of this technology.

METHOD

This cross-sectional study aimed to evaluate perceived usability and satisfaction with a robotic walking device in individuals diagnosed with stroke who were undergoing robot-assisted gait rehabilitation. Ethical approval was obtained from the Health Sciences Research Ethics Committee of Osmaniye Korkut Ata University (02/03/2026; No. 2026/3/16) prior to the start of the study. Data collection took place at the Physical Therapy and Rehabilitation Clinic of Istanbul Hospital, where robot-assisted walking programmes are routinely implemented. Participants were stroke patients receiving robotic walking rehabilitation who volunteered to take part in the study.

Participants' sociodemographic and clinical characteristics were collected using a demographic information form developed by the researchers. Spasticity levels were assessed using the Modified Ashworth Scale (MAS). Walking independence levels were determined using the Functional Ambulation Scale (FAS). Pain intensity was assessed using the Visual Analog Scale (VAS), and

individuals with a VAS score of 3 or higher were excluded from the study. Perceived usability and satisfaction with the robotic walking device were assessed using the Usability, Satisfaction, and Ease of Use (USE) Questionnaire. The USE questionnaire consists of 30 items scored on a scale of 1–7, with a total score ranging from 30 to 210.

Assessments were conducted at the end of the third session to ensure that participants gained basic experience with the robotic gait system. The scales were completed under the supervision of the researcher, and clinical assessments were performed by an experienced physical therapist.

Statistical Analysis

Statistical analyses were performed using IBM SPSS Statistics software (IBM Corp., Armonk, NY, USA). The normality of continuous variables was assessed using the Shapiro–Wilk test. Continuous variables were presented as median (minimum–maximum or IQR) values, while categorical variables were presented as counts and percentages. The relationships between the USE questionnaire subscales and clinical variables (FAS, MAS, and device usage duration) were evaluated using Spearman’s correlation analysis. The Mann–Whitney U test was used for comparisons between two groups, while the Kruskal–Wallis test was used for comparisons involving three or more groups. Results were considered statistically significant when $p < 0.05$.

RESULT

Participant characteristics

Total of 22 participants took part in the study. In terms of diagnosis, the sample included individuals with hemiplegia (31.8%), multiple sclerosis (22.7%), paraplegia (13.6%), cerebellar ataxia (13.6%), as well as other neurological conditions (18.3%). The mean duration of robotic device use was 28.45 ± 19.88 months, with values ranging between 1 and 60 months. Most participants (72.7%) had prior experience with robotic rehabilitation; the remaining 27.3% did not. FAS scores suggested that independent walking was uncommon in this sample (median: 1, IQR: 0–2), and most participants needed assistance. MAS findings pointed to generally moderate spasticity (median: 2, IQR: 0–2). Additional clinical details are given in Table 1.

Usability results

Usability was evaluated with the USE Questionnaire, covering three domains: usefulness, ease of use, and ease of learning. The mean usefulness score was 32.00 ± 17.39 (13–56). For ease of use, the mean was 42.77 ± 22.64 (11–77), and for ease of learning, 46.50 ± 25.64 (11–77). The total USE score averaged 121.27 ± 63.85 (52–210). Overall, usability perceptions were positive, with the highest scores in the ease of learning domain. Detailed descriptive statistics for the USE subscales are given in Table 2.

Reliability Analysis

The internal consistency of the USE questionnaire was found to be high. The Cronbach's alpha coefficient for the total score was 0.89, reflecting strong reliability.

Functional walking and spasticity results

Distribution analysis showed that 40.9% of participants were at FAS level 0, whereas only 4.5% reached level 4, suggesting limited independent walking ability. MAS results showed that 59.1% of participants scored 2 points, indicating moderate spasticity. Detailed distributions of FAS and MAS scores are presented in Table 3.

Correlation Analysis

Spearman's correlation analysis revealed strong positive correlations among the USE subscales ($r = 0.816-0.923$, $p < 0.05$), supporting the internal consistency of the usability construct. No significant correlation was found between USE total scores and FAS scores ($r = 0.11$, $p > 0.05$) or MAS scores ($r = -0.03$, $p > 0.05$). Similarly, USE scores did not show a significant correlation with robotic device usage time ($r = -0.19$, $p = 0.397$). Detailed correlation results are presented in Table 4.

Intergroup comparisons

Intergroup comparisons revealed no significant difference in total USE scores between participants with prior experience in robotic rehabilitation and those without ($U = 41.0$; $p = 0.631$). Similarly, no significant difference in USE scores was found among different diagnostic groups ($H = 10.67$; $p = 0.221$).

Overall, these findings suggest that perceptions of usability are independent of diagnosis, clinical severity, duration of device use, and prior experience with robotic rehabilitation. Detailed comparison results are presented in Table 5.

Tablo 1. Participant clinical characteristics

Variable	Value
Sample size (n)	22
Duration of device use (months), mean $\pm$ SD	28.45 $\pm$ 19.88
Duration of device use (months), median (IQR)	27 (12–48)
FAS, median (IQR)	1 (0–2)
MAS, median (IQR)	2 (0–2)
Previous robotic use, n (%)	16 (72.7)
No previous robotic use, n (%)	6 (27.3)

Data are presented as mean $\pm$ standard deviation (SD), median (interquartile range, IQR), or frequency (percentage).

Table 2. USE questionnaire results

Variable	Mean $\pm$ SD	Min–Max
Usefulness	32.00 $\pm$ 17.39	13–56
Ease of use	42.77 $\pm$ 22.64	11–77
Ease of learning	46.50 $\pm$ 25.64	11–77
USE total score	121.27 $\pm$ 63.85	52–210

Data are presented as mean $\pm$ standard deviation (SD) and minimum–maximum values.

Table 3. Distribution of FAS and MAS scores

Scale	Level	n (%)
FAS	0	9 (40.9)
	1	6 (27.3)
	2	4 (18.2)
	3	2 (9.1)
	4	1 (4.5)
MAS	0	6 (27.3)
	1	1 (4.5)
	2	13 (59.1)
	3	1 (4.5)
	4	1 (4.5)

Data are presented as frequency (n) and percentage (%).

Table 4. Spearman correlation matrix of USE subscales and clinical variables

Variable	1	2	3	4	5	6
1. Usefulness	–	0.816*	0.839*	0.879*	0.045	-0.164
2. Ease of use		–	0.855*	0.901*	-0.001	0.037
3. Ease of learning			–	0.923*	0.021	-0.076
4. USE total score				–	0.119	-0.030
5. FAS					–	0.060
6. MAS						–

Values show Spearman correlation coefficients (r). *Correlation is significant at the 0.05 level. Abbreviations: USE = Usefulness, Satisfaction and Ease of Use Questionnaire; FAS = Functional Walking Scale; MAS = Modified Ashworth Scale.

Table 5. Relationship between usability scores and clinical variables

Variable	Statistical test	Statistic	p
USE vs FAS	Spearman	r = 0.11	p > 0.05
USE vs MAS	Spearman	r = -0.03	p > 0.05
USE vs duration	Spearman	r = -0.19	0.397
USE vs previous robotic use	Mann–Whitney U	U = 41.0	0.631
USE vs diagnosis	Kruskal–Wallis	H = 10.67	0.221

Abbreviations: USE = Usefulness, Satisfaction and Ease of Use Questionnaire; FAS = Functional Ambulation Scale; MAS = Modified Ashworth Scale.

DISCUSSION AND CONCLUSION

The results of this study suggest that the robotic rehabilitation system is generally perceived as usable by participants with different neurological conditions. Positive scores across all USE questionnaire subscales, particularly in the ease of learning domain, indicate that the system can be understood and operated without major difficulty, even among individuals with varying functional limitations. These findings are in line with previous research on user experience with robotic walking systems. For instance, Louie and Eng (2022) reported that robotic exoskeleton use is both safe and well

accepted in individuals with stroke. Similarly, Bortole et al. (2015) found that exoskeleton-assisted walking training is feasible and user-friendly across different neurological populations. Similarly, Calabrò et al., (2018) emphasized that robotic gait training can increase patient engagement in neurological patients and that the technology is highly learnable.

The strong correlations observed among the USE subscales support the internal consistency of the usability concept and demonstrate that perceived usefulness, ease of use, and ease of learning are interrelated components of the user experience. This finding is consistent with the strong relationship between perceived usefulness and ease of use as defined in technology acceptance models. The Technology Acceptance Model developed by Davis (1989) has shown that ease of use directly influences perceived usefulness and that these two components determine user acceptance. Studies in the field of rehabilitation technologies similarly indicate that systems that are easy to learn are associated with higher levels of satisfaction and acceptance (Holden et al., 2007; Colombo et al., 2001).

Clinical Independence of Usability

One of the key findings of this study is the absence of a significant association between usability scores and clinical parameters such as functional walking level, spasticity severity, diagnosis, duration of device use, and prior experience with robotic rehabilitation. This result indicates that the perception of usability is largely independent of clinical severity. Studies examining the applicability of robotic walking systems across different functional levels also support this finding. In a systematic review by Mehrholz et al. (2025), it was noted that robot-assisted walking training is applicable particularly in patients with low functional levels and can be tolerated across different clinical severity levels. Similarly, Esquenazi (2012) reported that robotic walking devices are usable even in patients with severe walking limitations and that patient tolerance is high.

This finding offers important clinical implications for rehabilitation technology. The fact that the perception of usability is independent of functional status suggests that robotic rehabilitation systems can be used across a broad neurological population, not limited to specific patient groups. Indeed, Kwakkel and colleagues (2008) reported that robotic gait systems can be safely applied, particularly in patients with low mobility levels, and are suitable for use in the early rehabilitation process. Similarly, Klamroth-Marganska et al., (2014) emphasized that user satisfaction with robotic rehabilitation systems is related more to the device's ergonomic design and interaction features than to clinical severity.

From a rehabilitation standpoint, usability appears to be an important factor influencing how actively patients engage in treatment. When a system is perceived as easy to use and straightforward to learn, it may help sustain motivation and encourage adherence to technology-assisted interventions. Previous studies support this view. For instance, Maciejasz et al. (2014) suggested that robotic rehabilitation technologies can enhance patient motivation and promote more active involvement in therapy. Likewise, Colombo et al. (2001) highlighted that robotic gait systems facilitate patient participation by enabling repetitive and structured exercise.

Furthermore, the lack of a clear relationship between usability perceptions and clinical severity suggests that user experience may depend more on system design, interface quality, and human-device interaction than on patients' functional status. Previous studies on user-centered design in rehabilitation

technologies similarly indicate that ergonomic and intuitive systems are more likely to be accepted by users (Holden et al., 2007; Bortole et al., 2015). In this respect, the present findings suggest that robotic walking systems could support more patient-centered rehabilitation approaches.

Robotic walking devices appear to be not only technically feasible for neurological patients, but also acceptable to users and suitable for clinical rehabilitation. As user experience did not seem to vary significantly with clinical differences, these systems may be applicable in routine rehabilitation for a wide range of neurological patients. Overall, robotic walking systems can be considered a patient-centered option with good accessibility and meaningful clinical potential.

LIMITATIONS

These findings should be interpreted with some limitations in mind. The relatively small sample size may limit how far the results can be generalized. In addition, the cross-sectional design does not allow for clear conclusions about causal relationships between usability perceptions and clinical characteristics. It should also be noted that usability was assessed using self-reported measures, which may be influenced by individual perceptions.

Further studies with larger samples and longitudinal designs are needed to better understand usability outcomes and their relationship with rehabilitation effectiveness.

INFORMED CONSENT: Informed consent was obtained from the participants.

CONFLICT OF INTEREST: The authors declare that they have no conflict of interest.

DECLARATION OF FINANCIAL SUPPORT: The authors declare that they have not received any financial support in this regard.

AUTHORS' CONTRIBUTIONS: Concept (ANS), Design (ANS), Data Collection and/or Processing (OC), Drafting the Article (OC, ANS), Analysis and/or Interpretation (OC), Literature Review (OC, ANS), Critical Review (OC, ANS), Review (OC, ANS).

REFERENCES

- Belda-Lois, J. M., Mena-del Horno, S., Bermejo-Bosch, I., Moreno, J. C., Pons, J. L., Farina, D., ... & Rea, M. (2011). Rehabilitation of gait after stroke: a review towards a top-down approach. *Journal of neuroengineering and rehabilitation*, 8(1), 66. Doi: [10.1186/1743-0003-8-66](https://doi.org/10.1186/1743-0003-8-66)
- Bruni, M. F., Melegari, C., De Cola, M. C., Bramanti, A., Bramanti, P., & Calabrò, R. S. (2018). What does best evidence tell us about robotic gait rehabilitation in stroke patients: A systematic review and meta-analysis. *Journal of Clinical Neuroscience*, 48, 11-17. Doi: [10.1016/j.jocn.2017.10.048](https://doi.org/10.1016/j.jocn.2017.10.048)
- Bortole, M., Venkatakrishnan, A., Zhu, F., Moreno, J. C., Francisco, G. E., Pons, J. L., & Contreras-Vidal, J. L. (2015). The H2 robotic exoskeleton for gait rehabilitation after stroke: early findings from a clinical study. *Journal of neuroengineering and rehabilitation*, 12(1), 54. Doi: [10.1186/s12984-015-0048-y](https://doi.org/10.1186/s12984-015-0048-y)

Calabrò, R. S., Naro, A., Russo, M., Bramanti, P., Carioti, L., Balletta, T., ... & Bramanti, A. (2018). Shaping neuroplasticity by using powered exoskeletons in patients with stroke: a randomized clinical trial. *Journal of neuroengineering and rehabilitation*, 15(1), 35. Doi: [10.1186/s12984-018-0377-8](https://doi.org/10.1186/s12984-018-0377-8)

Colombo, G., Wirz, M., & Dietz, V. (2001). Driven gait orthosis for improvement of locomotor training in paraplegic patients. *Spinal cord*, 39(5), 252-255. Doi: [10.1038/sj.sc.3101154](https://doi.org/10.1038/sj.sc.3101154)

Davis, F. D. (1989). Perceived usefulness, perceived ease of use, and user acceptance of information technology. *MIS quarterly*, 13(3), 319-340. Doi: [10.2307/249008](https://doi.org/10.2307/249008)

Esquenazi, A., Talaty, M., Packel, A., & Saulino, M. (2012). The ReWalk powered exoskeleton to restore ambulatory function to individuals with thoracic-level motor-complete spinal cord injury. *American journal of physical medicine & rehabilitation*, 91(11), 911-921. Doi: [10.1097/PHM.0b013e318269d9a3](https://doi.org/10.1097/PHM.0b013e318269d9a3)

French, B., Thomas, L. H., Leathley, M. J., Sutton, C. J., McAdam, J., Forster, A., ... & Watkins, C. L. (2009). Repetitive task training for improving functional ability after stroke. *Stroke*, 40(4), e98-e99. Doi: [10.1161/STROKEAHA.108.519553](https://doi.org/10.1161/STROKEAHA.108.519553)

Holden, M. K., Dyar, T. A., & Dayan-Cimadoro, L. (2007). Telerehabilitation using a virtual environment improves upper extremity function in patients with stroke. *IEEE transactions on neural systems and rehabilitation engineering*, 15(1), 36-42. Doi: [10.1109/TNSRE.2007.891388](https://doi.org/10.1109/TNSRE.2007.891388)

Jørgensen, H. S., Nakayama, H., Raaschou, H. O., & Olsen, T. S. (1995). Recovery of walking function in stroke patients: The Copenhagen Stroke Study. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 76(1), 27-32. Doi: [10.1016/S0003-9993\(95\)80038-7](https://doi.org/10.1016/S0003-9993(95)80038-7)

Klamroth-Marganska, V., Blanco, J., Campen, K., Curt, A., Dietz, V., Ettlin, T., ... & Riener, R. (2014). Three-dimensional, task-specific robot therapy of the arm after stroke: a multicentre, parallel-group randomised trial. *The Lancet Neurology*, 13(2), 159-166. Doi: [10.1016/S1474-4422\(13\)70305-3](https://doi.org/10.1016/S1474-4422(13)70305-3)

Kwakkel, G., Kollen, B. J., & Krebs, H. I. (2008). Effects of robot-assisted therapy on upper limb recovery after stroke: a systematic review. *Neurorehabilitation and neural repair*, 22(2), 111-121. Doi: [10.1177/1545968307305457](https://doi.org/10.1177/1545968307305457)

Leow, X. R. G., Ng, S. L. A., & Lau, Y. (2023). Overground robotic exoskeleton training for patients with stroke on walking-related outcomes: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 104(10), 1698-1710. Doi: [10.1016/j.apmr.2023.03.006](https://doi.org/10.1016/j.apmr.2023.03.006)

Louie, D. R., & Eng, J. J. (2016). Powered robotic exoskeletons in post-stroke rehabilitation of gait: a scoping review. *Journal of neuroengineering and rehabilitation*, 13(1), 53. Doi: [10.1186/s12984-016-0162-5](https://doi.org/10.1186/s12984-016-0162-5)

Louie, D. R., Mortenson, W. B., Lui, M., Durocher, M., Teasell, R., Yao, J., & Eng, J. J. (2022). Patients' and therapists' experience and perception of exoskeleton-based physiotherapy during subacute

stroke rehabilitation: a qualitative analysis. *Disability and Rehabilitation*, 44(24), 7390-7398. Doi: [10.1080/09638288.2021.1989503](https://doi.org/10.1080/09638288.2021.1989503)

Maciejasz, P., Eschweiler, J., Gerlach-Hahn, K., Jansen-Troy, A., & Leonhardt, S. (2014). A survey on robotic devices for upper limb rehabilitation. *Journal of neuroengineering and rehabilitation*, 11(1), 3. Doi: [10.1186/1743-0003-11-3](https://doi.org/10.1186/1743-0003-11-3)

McDonald, C., Fingleton, C., Murphy, S., & Lennon, O. (2022). Stroke survivor perceptions of using an exoskeleton during acute gait rehabilitation. *Scientific Reports*, 12(1), 14185. Doi: [10.1038/s41598-022-18188-7](https://doi.org/10.1038/s41598-022-18188-7)

Mehrholz, J., Kugler, J., Pohl, M., & Elsner, B. (2025). Electromechanical-assisted training for walking after stroke. *Cochrane database of systematic reviews*, (5). Doi: [10.1002/14651858.CD006185.pub6](https://doi.org/10.1002/14651858.CD006185.pub6)

Vaughan-Graham, J., Brooks, D., Rose, L., Nejat, G., Pons, J., & Patterson, K. (2020). Exoskeleton use in post-stroke gait rehabilitation: a qualitative study of the perspectives of persons post-stroke and physiotherapists. *Journal of neuroengineering and rehabilitation*, 17(1), 123. Doi: [10.1186/s12984-020-00750-x](https://doi.org/10.1186/s12984-020-00750-x)

Pediatric İntrakranial Kistik Lezyon Kist Hidatik-Olgusu sunumu

Dr. Kübra ARSLAN¹, Dr. Mustafa ARSLAN²

¹E-mail: kbrab91@gmail.com; Gaziantep Şehir Hastanesi, Tıbbi Patoloji Kliniği, Gaziantep, Türkiye.

²E-mail: mustafaarslan_60@hotmail.com.tr; Gaziantep Şehir Hastanesi, Beyin ve Sinir Cerrahisi

Kliniği, Gaziantep, Türkiye.

Özet

Kistik ekinokokkoz, dünya genelinde önemli bir halk sağlığı sorunu olmaya devam etmektedir. Dünya Sağlık Örgütü (WHO), hidatik hastalığı “ihmal edilen tropikal hastalıklar” (NTDs) arasında sınıflandırmakta; sadece klinik sonuçlarını değil önemli sosyoekonomik yükünü de vurgulamaktadır. Yüksek riskli bölgeler arasında Akdeniz havzası, Orta Doğu, Orta Asya, Güney Amerika ve Afrika’nın belirli bölgeleri yer almaktadır. Echinococcus granulosus’un neden olduğu hidatik kist hastalığı, ağırlıklı olarak karaciğer ve akciğerleri etkileyen parazitik bir enfeksiyondur; beyin tutulumu son derece nadirdir. Endemik bölgelerde, tespit edilen her kistik lezyon, olası hidatik hastalık açısından dikkatlice değerlendirilmelidir.

Anahtar Kelimeler: Hidatik, İntrakranial, Kist,

Abstract

Cystic echinococcosis remains a significant public health problem worldwide. The World Health Organization (WHO) classifies hydatid disease as a "neglected tropical disease" (NTD), emphasizing not only its clinical consequences but also its significant socioeconomic burden. High-risk regions include the Mediterranean basin, the Middle East, Central Asia, South America, and certain parts of Africa. Hydatid cyst disease, caused by Echinococcus granulosus, is a parasitic infection that primarily affects the liver and lungs; brain involvement is extremely rare. In endemic areas, every cystic lesion detected should be carefully evaluated for possible hydatid disease.

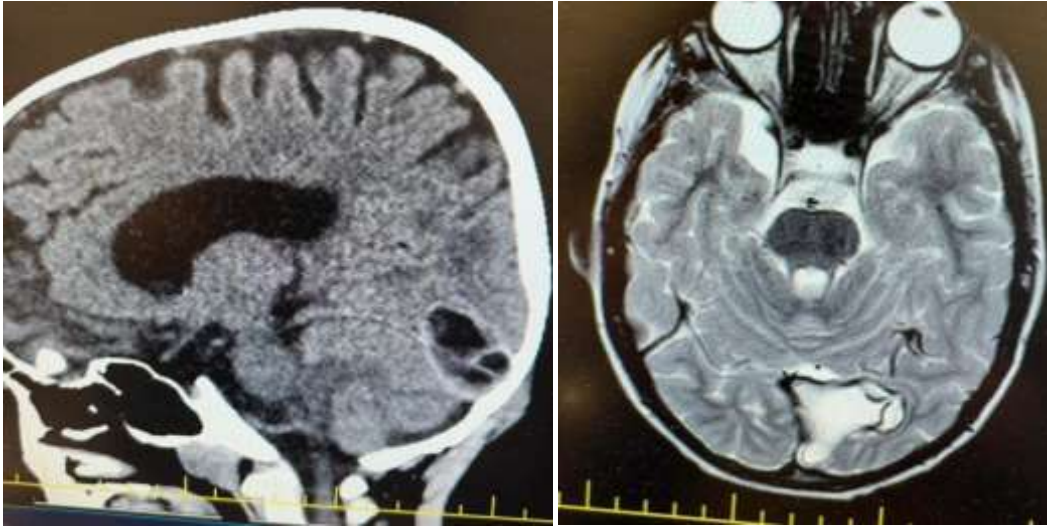
Keywords: Hydatid, Intracranial, Cyst

GİRİŞ

Kistik ekinokokkoz, dünya genelinde önemli bir halk sağlığı sorunu olmaya devam etmektedir. Dünya Sağlık Örgütü (WHO), hidatik hastalığı “ihmal edilen tropikal hastalıklar” (NTDs) arasında sınıflandırmakta; sadece klinik sonuçlarını değil önemli sosyoekonomik yükünü de vurgulamaktadır. Yüksek riskli bölgeler arasında Akdeniz havzası, Orta Doğu, Orta Asya, Güney Amerika ve Afrika’nın belirli bölgeleri yer almaktadır. İntrakranial yerleşimli kist hidatik olgumuzu sunarak kranial yerleşimli nonneoplastik lezyonların da ayırıcı tanıda akılda tutulmasını amaçladık.

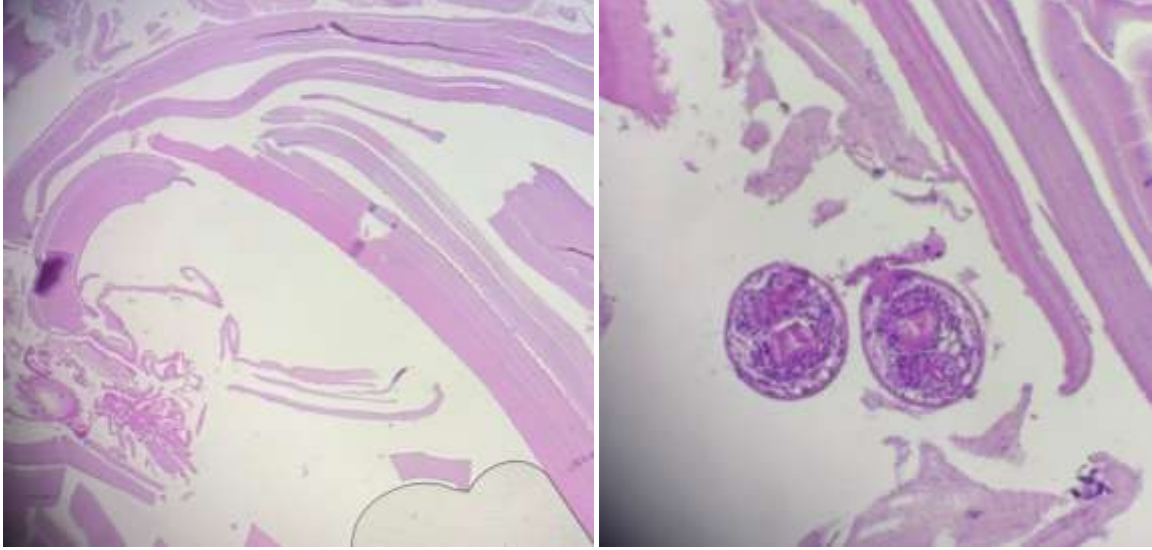
OLGU

Olgumuz 6 yaşında erkek hasta baş ağrısı şikayeti mevcut olan hastanın Manyetik rezonans görüntülemesinde konfluens sinuum komşuluğunda içerisi berrak mayii ile dolu kistik lezyon varlığı tespit edilmiş olup tarafımıza lezyon eksize edilerek gönderilmişti. Makroskopik incelemede total boyutu 4x3x2cm boyutlarında septasyonlar içeren kistik lezyon izlendi. Lezyonun tamamı bloklanarak takip, gömme ve kesit işlemlerinden geçtikten sonra Hematoksilen Eozin boyalı preparatların mikroskopik incelemesinde aselüler lameller membran, germinatif membran ve az sayıda skolekslerin varlığı dikkati çekti. Mevcut bulgularla olgu “Kist Hidatik” ile uyumlu olarak raporlandı.



Resim 1. Sol serebellar hemisfer posteriorunda kemikte hafif destrüksiyona neden olan septasyonlar içeren 30x27mm boyutta lobüle konturlu kitlesel görünüm, Sagittal beyin BT

Resim 2. Sol oksipitalde tentoryum düzeyinde kranial kemik defektiyleektrakranial alana uzanım gösterenperiferal kontrastlanan 4 cm çaplı kistik lezyon, Aksiyel beyin MR



Resim 3. Aselüler lameller membran, germinatif membran, Resim 4. Skoleksler (x10, HE)

SONUÇ VE TARTIŞMA

Kistik ekinokokkoz, dünya genelinde önemli bir halk sağlığı sorunu olmaya devam etmektedir. Dünya Sağlık Örgütü (WHO), hidatik hastalığı “ihmal edilen tropikal hastalıklar” (NTDs) arasında sınıflandırmakta; sadece klinik sonuçlarını değil önemli sosyoekonomik yükünü de vurgulamaktadır. Yüksek riskli bölgeler arasında Akdeniz havzası, Orta Doğu, Orta Asya, Güney Amerika ve Afrika’nın belirli bölgeleri yer almaktadır. Echinococcus granulosus’un neden olduğu hidatik kist hastalığı, ağırlıklı olarak karaciğer ve akciğerleri etkileyen parazitik bir enfeksiyondur; beyin tutulumu son derece nadirdir ve dünya genelindeki tüm vakaların yalnızca %1-2’sini oluşturur. Bu durum, özellikle Akdeniz ülkeleri olmak üzere, koyun ve sığır yetiştirilen bölgelerde en yaygındır. Serebral hidatik hastalığı özellikle nadirdir ve vakaların çoğu, kontamine gıda yoluyla veya enfekte hayvanlarla doğrudan temas yoluyla gelişir ve daha çok çocuklarda görülür. Bilgisayarlı tomografi (BT) ve manyetik rezonans görüntüleme (MRG) gibi görüntüleme yöntemleri, tanı koymada çok önemli bir rol oynar. Minimal periferik ödemli hipodens, kistik lezyon şeklinde görülür. Tedavinin temel amacı, nüks veya şiddetli inflamatuvar reaksiyonları önlemek için kistin yırtılmadan tamamen cerrahi olarak çıkarılmasıdır.

Hidatik hastalığın patogenezi, Echinococcus granulosus yumurtalarının oral yolla alınmasını takiben başlayan bir konak–parazit etkileşiminden kaynaklanır. Yumurtalar ince barsakta çatladıktan sonra, açığa çıkan onkosferler barsak mukozasını geçer ve portal dolaşıma girer. Karaciğer ilk kapiller filtreyi temsil ettiği için en sık etkilenen organdır. Onkosferlerin önemli bir kısmı hepatik sinüzoidlerde tutulurken, daha küçük bir kısmı pulmoner dolaşıma geçer ve akciğerde yerleşir. Daha nadir olarak, onkosferler sistemik dolaşıma girerek dalak, böbrekler, kemikler, beyin ve diğer dokular gibi organlarda hidatik kistlere neden olabilir.

Kafa içi hidatik kistler daha çok çocuk hastalarda görülür ve genellikle parietal veya oksipital lobları etkilemektedir. Semptomlar arasında artmış kafa içi basıncı (baş ağrısı, kusma, papil ödem), nöbetler veya focal nörolojik defisitler bulunur. Kist rüptürü, hidatik hastalığın en ciddi komplikasyonlarından

biridir ve kendiliğinden veya travmaya bağlı olarak ortaya çıkabilir. Rüptür sonrası kist içeriklerinin dolaşıma veya seröz boşluklara yayılması, ürtiklerden yaşamı tehdit eden anafilaktik şoka kadar geniş bir yelpazede alerjik reaksiyonları tetikleyebilir. Sekonder bakteriyel enfeksiyonu da görülebilir ve ateş, lökositoz ve sepsis ile kendini gösterir. Hidatik hastalıktaki klinik belirtilerin heterojenliği, tanı ve yönetimde multidisipliner bir yaklaşım gerektirir. Erken tanı, komplikasyonların önlenmesi ve en uygun tedavi stratejisinin seçilmesi için kritik öneme sahiptir. Enzim bağlı immünosorbent testi (ELISA) gibi serolojik testler, Echinococcus'a karşı spesifik antikorları tespit ederek tanıyı destekleyebilir.

Hidatik hastalık, hem klinik hem de radyolojik açıdan çok çeşitli patolojileri taklit edebilir. Bu nedenle, ayırıcı tanı, lezyon lokalizasyonu, görüntüleme özellikleri, epidemiyolojik geçmiş ve serolojik bulguları içermelidir. Endemik bölgelerde, tespit edilen her kistik lezyon, olası hidatik hastalık açısından dikkatlice değerlendirilmelidir. Santral sinir sistemi kistleri için ayırıcı tanımlar arasında araknoid kistler, kistik tümörler, nörosistiserkoz ve apseler bulunur. Bu atipik lokalizasyonlarda, hidatik hastalık sıklıkla tanı gecikmelerine yol açar. Hidatik hastalığa yönelik terapötik yaklaşım, durumun heterojen doğası nedeniyle bireyselleştirilmelidir. Şu anda kabul gören temel ilke, tedavinin kistin biyolojik aktivitesini ve evresini (WHO-IWGE sınıflamasına göre), ayrıca lokalizasyonunu, boyutunu, komplikasyon varlığını ve hasta spesifik klinik özelliklerini dikkate alarak planlanması gerektiğidir. Biyolojik olarak inaktif kistler asemptomatik oldukları ve komplikasyon belirtisi göstermedikleri sürece aktif tedavi gerektirmeyebilir. Çeşitli çalışmalar, inaktif kistlerin çoğunluğunun zamanla stabil kaldığını ve reaktivasyon oranının düşük olduğunu göstermiştir. Albendazol, medikal tedavinin temel taşıdır ve özellikle küçük aktif kistler ve cerrahi ya da perkütan girişimler öncesi-sonrası periprosedürel dönemde etkilidir. Ultrasonografik veya BT rehberliğinde uygulanan PAIR tekniği (Punktür–Aspirasyon–İnjesiyon–Reaspirasyon), bazı kist tiplerinde etkili ve minimal invaziv bir tedavi seçeneğidir. Cerrahinin birincil amaçları, parazitin tamamen eradike edilmesi, kist içeriğinin güvenli bir şekilde çıkarılması ve komplikasyonların önlenmesidir. Sonuç olarak Echinococcus granulosus'un neden olduğu hidatik kist hastalığı, ağırlıklı olarak karaciğer ve akciğerleri etkileyen parazitik bir enfeksiyondur; beyin tutulumu son derece nadirdir. Endemik bölgelerde, tespit edilen her kistik lezyon, olası hidatik hastalık açısından dikkatlice değerlendirilmelidir

KAYNAKÇA

- Zülfıkaroğlu, B., Akgül, Ö., & Dinç, T. (2026). Rare anatomical localizations of hydatid cysts (2020–2025): Narrative review of presentation, imaging, and management. Turkish Journal of Surgery, 42(1), 13–25. <https://doi.org/10.47717/turkjsurg.2026.2025-9-22>
- Journal of Korean Neurosurgical Society, 68(2), 229–233. (2025). <https://doi.org/10.3340/jkns.2024.0184>
- Journal of Surgical Case Reports, 2025(3), Article rjaf135. (2025). <https://doi.org/10.1093/jscr/rjaf135>
- Innovative Applications and Research Methods in Health Sciences: Diagnosis and treatment of hydatid cyst. (n.d.). <https://doi.org/10.5281/zenodo.18098931>

Uterin Nadir Bifazik Kitle Adenosarkoma-Olgusu sunumu

Dr. Kübra ARSLAN

E-mail: kbrab91@gmail.com; Gaziantep Şehir Hastanesi, Tıbbi Patoloji Kliniği, Gaziantep, Türkiye

Özet

Uterin adenosarkoma tüm uterin sarkomların %8 ini ve tüm uterin malignitelerin %0.2sinden daha azını oluşturan nadir bir malign tümördür. Bununla birlikte nadir görülmesi ve nonspesifik doğası nedeniyle patolojik tanı da dahil olmak üzere klinik muayene ve görüntülemelerde sıklıkla yanlış teşhis edilebilir.

Anahtar Kelimeler: Adenosarkoma, Endometrial, Neoplazm. Uterin

Abstract

Uterine adenocarcinoma is a rare malignant tumor, accounting for 8% of all uterine sarcomas and less than 0.2% of all uterine malignancies. However, due to its rarity and non-specific nature, it is frequently misdiagnosed during clinical examination and imaging, including pathological diagnosis.

Keywords: Adenocarcinoma, Endometrial, Neoplasm, Uterine

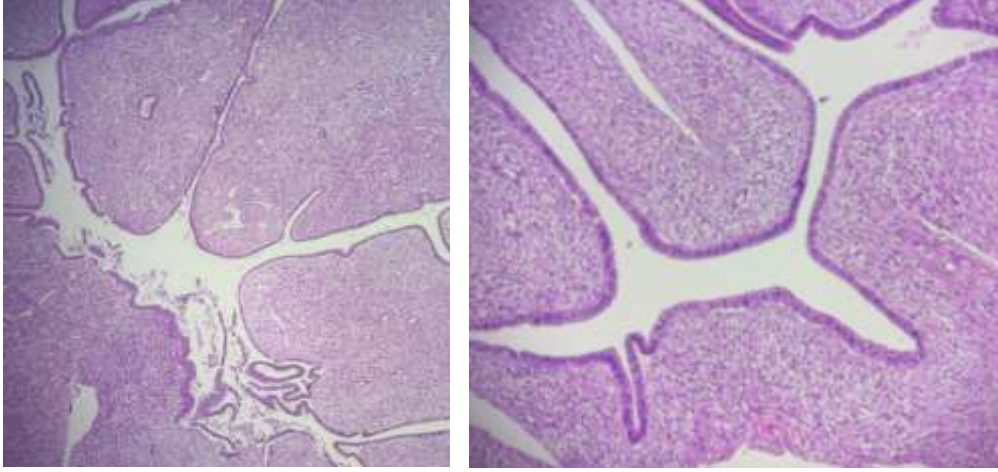
GİRİŞ

Uterin adenosarkoma tüm uterin sarkomların %8 ini ve tüm uterin malignitelerin %0.2sinden daha azını oluşturan nadir bir malign tümördür. Bununla birlikte nadir görülmesi ve nonspesifik doğası nedeniyle patolojik tanı da dahil olmak üzere klinik muayene ve görüntülemelerde sıklıkla yanlış teşhis edilebilir. Nadir bir uterin kitle nedeni olan endometrial düşük dereceli adenosarkoma olgumuzu sunarak bu antiteye ve ayırıcı tanılarına dikkat çekmeyi amaçladık.

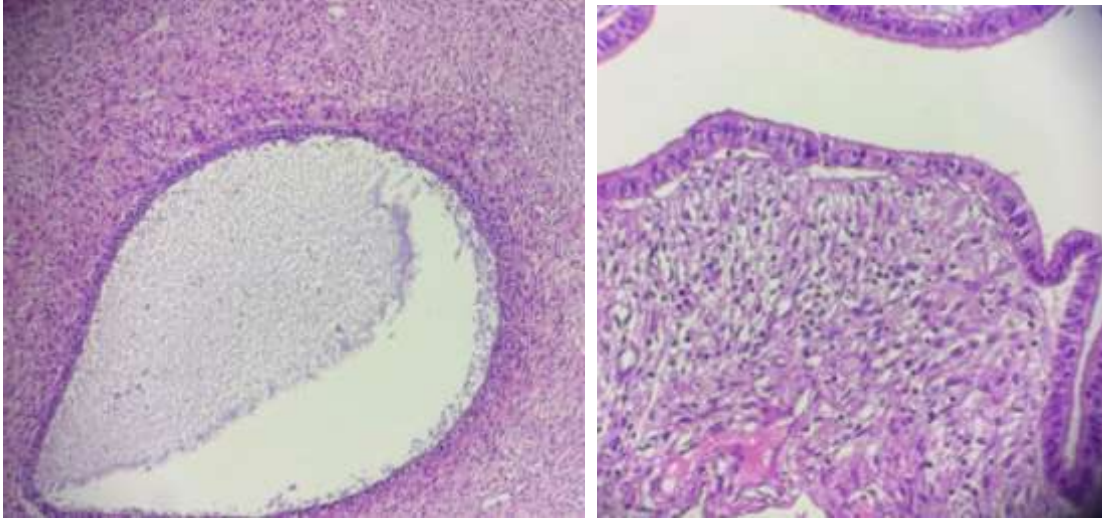
OLGU

Olgumuz 47 yaşında kadın hasta anormal uterin kanama şikayeti mevcut olan hasta son birkaç yıldır tekrarlayan endometrial polip tanısı alarak takip edilmiş ve sonrasında histerektomi yapılmıştı. Makroskopik incelemede uterin kavitede korpus yerleşimli 5x3cm boyutta belirgin myometrial invazyon göstermeyen polipoid nitelikte kitle mevcuttu. Alt uterin segmentle lezyonun ilişkisi yoktu ve servikste de özellik izlenmedi. Materyalden uygun örnekler alınarak bloklandı ve takip, gömme ve kesit işlemlerinin ardından Hematoksilen Eozin boyalı preparatların mikroskopik incelemesinde de stromal genişleme varlığı belirgin göze çarpan hiperselüler karakterde stromal alanlar ile silyalı kübo/kolumnar epitelle döşeli benign glandüler komponenti bulunan polipoid karakterde bifazik proliferasyon varlığı izlendi. Stromal hücrelerde hafif atipi izlenmekle birlikte 2mm² de 2-3 adet mitoz izlendi. Nekroz görülmedi. Olgunun bazı alanlarında belirgin periglandüler stromal yoğunlaşma varlığı da dikkati çekti.

İmmünohistokimyasal analizde stromal hücrelerde CD10 boyasıyla pozitif ekspresyon izlenirken, ER boyasıyla hem glandüler hem stromal hücrelerde pozitif ekspresyon mevcuttu. Tümörde p53 immünohistokimyasal boyası ile wild tipte boyanma izlendi. Mevcut bulgularla olgu ‘‘Düşük Dereceli Adenosarkoma’’ olarak raporlandı.



Resim 4.Stromal genişleme varlığı, hiperselüler karakterde stromal alanlar ile silyalı kübo/kolumnar epitelle döşeli benign glandüler komponenti bulunan polipoid karakterde bifazik proliferasyon (x4, HE), **Resim 5.** (x20, HE)



Resim 6. Periglandüler stromal yoğunlaşma (x20, HE), **Resim 7.** Stromal hiperselülerite ve hafif atipi ile benign glandüler komponent (x20, HE)



Resim 8. p53 ile wild tip boyanma (x10, İHK), Resim 9. Ki67 proliferasyon indeksi %7-8 (x10, İHK)

SONUÇ VE TARTIŞMA

Uterin adenosarkoma ayırıcı tanılarında özellikle adenofibroma, endometrial polip ve endometrial stromal sarkomun düşünülmesi gereken bir antitedir. Uterin adenofibroma ilk olarak 1959'da Ober tarafından tanımlanan benign epitelyal ve mezenkimal bileşenlerden oluşan bir tümördür. Adenofibromlar her yaşta görülebilir, ancak ortalama 57 yaşında postmenopozal kadınlarda ortaya çıkar. Adenofibromların yaklaşık %90'ı endometriumda, diğer %10'u ise endoservikste ortaya çıkar. Anormal uterin kanama en sık görülen belirtidir. MR görüntülemeye, endometrial adenofibroma tipik olarak düzgün sınırlı, büyük multikistik kitle olarak görülür. Kitle genellikle heterojen solid bileşenler ve multikistik alanlar gösterir. Endometrial adenofibromlar, sıklıkla yanlış yorumlanan bir tanıdır ve endometrial karsinom ve endometrial adenosarkomdan ayırt edilmesi zordur. Uterin adenofibroma daha önce benign mikst epitelyal ve mezenkimal tümör olarak sınıflandırılıyordu, ancak Dünya Sağlık Örgütü, düşük dereceli adenosarkom ve benign poliplerle tanısal örtüşme nedeniyle beşinci baskısından bu tanıyı çıkardı. Makroskopi, histopatoloji ve immünoprofil açısından ortak özelliklere sahip oldukları için adenofibromu adenosarkomdan ayırt etmek zordur. Uterin adenosarkoma, tüm uterin sarkomların %8'ini ve tüm uterin malignitelerin %0,2'sinden daha azını oluşturan nadir bir malign tümördür. Bununla birlikte, nadir görülmesi ve nonspesifik doğası nedeniyle, patolojik tanı da dahil olmak üzere klinik muayenelerde ve görüntüleme çalışmalarında sıklıkla yanlış teşhis edilir. En sık 40-65 yaşları arasında görülmekle birlikte, daha genç ve daha yaşlı hastalarda da vakalar bildirilmiştir. İlk olarak 1974'te Clement ve Scully tarafından tanımlanan bu hastalık, fokal atipi gösterebilen benign glandlar ve düşük dereceli malign stromal bileşenin bir arada bulunmasıyla karakterizedir. Uterus adenosarkomları için risk faktörleri arasında pelvik radyasyon öyküsü, aşırı östrojen, tamoksifen tedavisi, obezite, diyabet, endometriozis ve adenomiyozis yer almaktadır. Sarkomatöz aşırı büyüme, myometrial invazyon, boyut, mitoz, yaş, FIGO evresi, rezeksiyon durumu, nekroz, hücrel atipi, heterolog elementler ve rabdomyosarkomatöz diferansiasyon varlığı uterus adenosarkomu için prognostik faktörleri

oluşturmaktadır. Klinik olarak, anormal uterin kanama, genellikle hızla büyüyen bir pelvik kitle ile birlikte görülen en belirgin semptomdur. Vakaların yaklaşık %60'ında hastalık uterusu sınırlıdır (evre I) ve beş yıllık genel sağkalım oranı yaklaşık %80'dir. Kötü prognoz kriterleri arasında myometrial invazyon, lenfovasküler invazyon, heterolog farklılaşma ve en önemlisi tümör hacminin %25'den fazlasında sarkomatöz overgrowth varlığı yer almaktadır. Bu durum nüks oranlarını %70-80'e çıkarır ve beş yıllık sağkalımı yaklaşık %50'ye düşürür. Total abdominal histerektomi+bilateral salpingooferektomi tercih edilen tedavi yöntemidir. Lenf nodu metastazlarının düşük görülme sıklığı nedeniyle rutin lenf nodu diseksiyonu genellikle yapılmaz. Adjuvant radyoterapi ve kemoterapinin faydası tartışmalı olmaya devam ederken, hormon tedavisi özellikle sarkomatöz aşırı büyümenin olmadığı seçilmiş vakalarda düşünülebilir. Adenosarkomu, atipi içermeyen ve düşük mitotik aktivite gösteren adenofibromanın yanısıra hem epitel hem de stromal bileşen malignitesi nedeniyle daha kötü bir prognoza sahip olan karsinosarkomadan da ayırt etmek çok önemlidir. Ayrıca endometrial stromal sarkom da adenosarkomu taklit edebilir, bu da genellikle Müllerian kökenini doğrulamak için immünohistokimya (örneğin, CD10, WT1) gerektirir. Bizim vakamızda östrojen reseptör (ER) pozitifliği doğrulanmış olmakla birlikte aşırı ekspresyonu daha agresif davranışla ilişkili olan p53 ile olgumuzda wild tipte boyanma izlendi. FIGO sistemine göre cerrahi evreleme, prognoz ve adjuvan tedavinin yönlendirilmesi için esastır. Evre IB'de derin miyometrial invazyon ve lenf nodu tutulumunun olmaması, lenf nodu metastaz riskinin düşük olması nedeniyle genellikle rutin lenfadenektomiye gereksiz kılar. Sarkomatöz aşırı büyümenin yokluğunda, adjuvan hormon tedavisi önem kazanır: GnRH agonistleri, progestinler, aromataz inhibitörleri ve seçici östrojen reseptör modülatörleri ile 10 aydan 7 yıla kadar değişen sürelerde yanıtlar belgelenmiştir. Bazı çalışmalar, yüksek riskli tümörlerde radyasyonun palyatif faydasını ve yüksek dereceli sarkomlarda doksorubisin/ifosfamid veya gemitabin/dosetaksel rejimlerine izole yanıtlarını öne sürmektedir. Takip miyometrial invazyon, sarkomatöz aşırı büyüme ve heterolog farklılaşma gibi prognostik faktörlere göre uyarlanmalıdır. Olumsuz özellikleri olmayan hastalarda nüks riski düşüktür ve genellikle üç ayda bir klinik değerlendirme ve altı ayda bir görüntüleme yeterlidir. Adenosarkoma içsi hücrelerinin immünofenotipinin, genellikle CD10, ER ve PR ekspresyonu pozitif olan ve sarkomatöz aşırı büyüme vakalarında kaybolma eğiliminde olan endometrial stromal tümörlerinkine benzediği bildirilmiştir. Olgumuzda stromal içsi hücreler CD10 ve ER için pozitif iken Ki-67 indeksi yaklaşık %7-8 idi ve adenosarkomlarda %30'dan yüksek Ki-67 indeksinin kötü prognozla ilişkili olduğu bildirilmiştir. Ayrıca, adenofibroma, Dünya Sağlık Örgütü (WHO) sınıflandırmasının beşinci baskısından çıkarılmıştır. Çünkü daha önce adenofibroma tanısı alan tümörlerin çoğunun aslında düşük dereceli adenosarkomlar veya olağandışı morfolojiye sahip benign polipler olduğu bildirilmiştir.

KAYNAKÇA

Camejo, N., Garcia, M., Castillo, C., & Krygier, G. (2025). Low-grade uterine adenosarcoma in a postmenopausal patient: A case report and literature review. *European Journal of Medical and Health Research*, 3(3), 138–141. doi:10.59324/ejmhr.2025.3(3).21

Hasegawa, C., Washimi, K., Hiroshima, Y., et al. (2023). Differential diagnosis of uterine adenosarcoma: Identification of JAZF1-BCORL1 rearrangement by comprehensive cancer genomic profiling. *Diagnostic Pathology*, 18, 5. doi:10.1186/s13000-022-01279-4

Nakai, G., Yamada, T., Tanaka, T., Yamamoto, K., & Osuga, K. (2026). Recurrent uterine adenofibroma revealed to be hyperparathyroidism–jaw tumor syndrome: A case report. *Radiology Case Reports*, 21(3), 1311–1317. doi:10.1016/j.radcr.2025.12.015

Toremifene. (2023). *Reactions Weekly*, 1967(1), 336. doi:10.1007/s40278-023-44143-4

Tiroidde Metastatik Akciğer Adenokarsinomu: İmmünohistokimyasal Bulgular Eşliğinde Bir Olgu

Dr. Kübra ARSLAN

E-mail: kbrab91@gmail.com; Gaziantep Şehir Hastanesi, Tıbbi Patoloji Kliniği, Gaziantep, Türkiye

Özet

Tiroid bezinde metastatik tümörler nadirdir ve otopsi çalışmalarında genel prevalansı %5,9'dur. Son klinik serilerde, ikincil tiroid kanseri malign tiroidlerin sadece %1,9'unda görülmektedir. Genel olarak (K/E oranı 1,07:1) ve yaygın histolojik tiplere (RCC, akciğer adenokarsinomu ve kolorektal adenokarsinom) göre sınıflandırıldığında cinsiyet ayrımı yoktur. Tiroid nadir de olsa metastaz alabilen bir organdır. Primer tanısı bulunan olgularda ayırıcı tanıda metastazlar da mutlaka akılda tutulmalıdır.

Anahtar Kelimeler: Akciğer adenokarsinoma, Metastaz, Tiroid

Abstract

Metastatic tumors in the thyroid gland are rare, with a general prevalence of 5.9% in autopsy studies. In recent clinical series, secondary thyroid cancer is seen in only 1.9% of malignant thyroids. Generally, there is no gender distinction when classified according to the male/female ratio (1.07:1) and common histological types (RCC, lung adenocarcinoma, and colorectal adenocarcinoma). Although rare, the thyroid is an organ that can metastasize. In cases with a primary diagnosis, metastases should always be considered in the differential diagnosis.

Keywords: Lung adenocancer, Metastasis, Thyroid

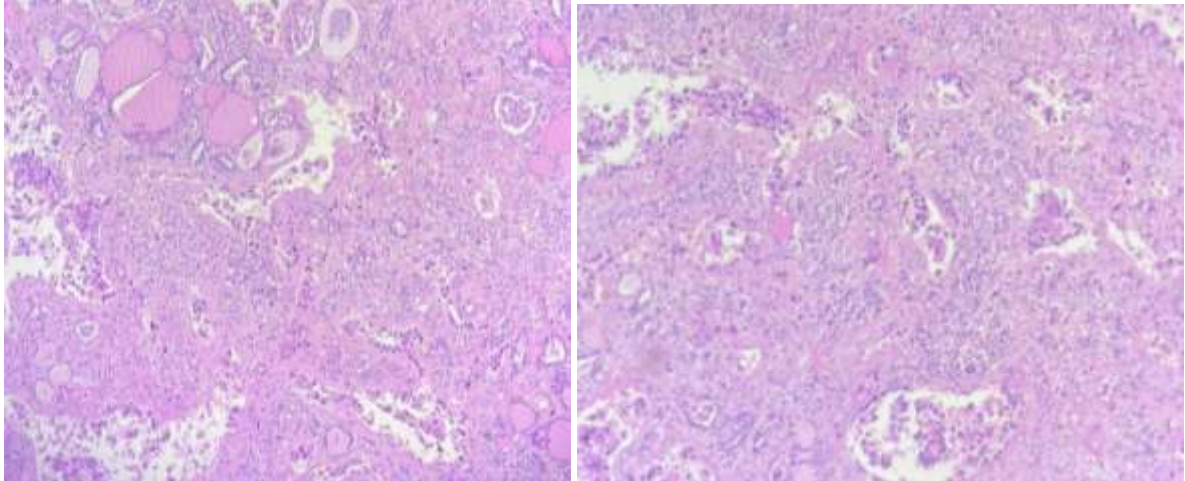
GİRİŞ

Tiroid bezinde metastatik tümörler nadirdir ve otopsi çalışmalarında genel prevalansı %5,9'dur. Son klinik serilerde, ikincil tiroid kanseri malign tiroidlerin sadece %1,9'unda görülmektedir. Genel olarak (kadın-erkek oranı 1,07:1) ve yaygın histolojik tiplere (renal hücreli karsinom, akciğer adenokarsinomu ve kolorektal adenokarsinom) göre sınıflandırıldığında cinsiyet ayrımı yoktur. Büyük çalışmalarda metastatik tiroid tümörü tanısı konulan hastaların medyan yaşı 54-68 arasında değişmektedir. Metastazlar, önceden var olan veya eş zamanlı tiroid patolojisi olan hastalarda daha sık görülür. Otopsi çalışmalarında en yaygın primer bölgeler meme karsinomu ve akciğer karsinomudur. Klinik serilerde ise böbrek hücreli karsinom, akciğer karsinomu ve meme karsinomu baskındır. Bu olgumuzu sunarak tiroidin nadir de olsa metastaz alabilen bir organ olduğunu ve primer tanısı bulunan olgularda ayırıcı tanıda metastazların da akılda tutulması gerektiğini vurgulamak istedik.

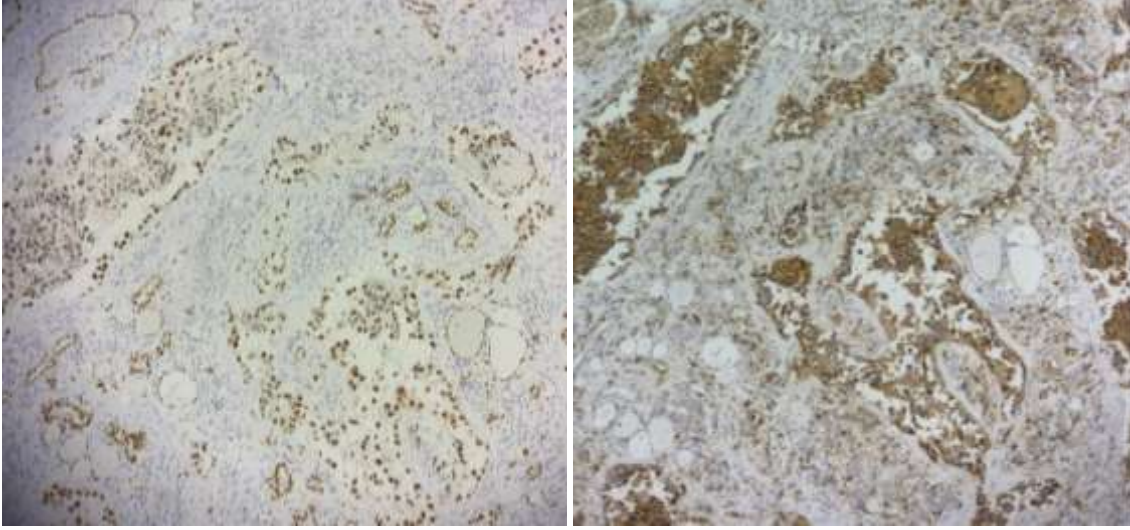
OLGU

Olgumuz 61 yaşında kadın hasta bilinen akciğer adenokarsinoma tanısı mevcuttu. Olguda çekilen PET-CT sinde senkron tiroid malignitesi düşünüülerek total tiroidektomi ve trakea önü santral yerleşimli lenf nodu eksizyonu yapılarak tarafımıza gönderildi. Makroskopik incelemede sol lobu 4,5x2x2cm isthmusu 2,5x1x1cm ve sağ lobu 4x2x2cm ölçülerindeki total tiroidektomi materyalinin tüm lobları dilimlenerek incelendiğinde dağınık heterojen beyaz renkli alanların varlığı dikkati çekti. Uygun örnekler alınarak bloklandıktan sonra takip, gömme ve kesit işlemlerinden geçti. Daha sonra Hematoksilen Eozin boyalı preparatların mikroskopik incelemesinde tiroidin hemen tamamını infiltre etmiş görünümde hiperkromatik pleomorfik nükleuslu belirgin nükleollü atipik karakterde epiteliyal hücrelerin meydana getirdiği çoğunlukla solid paternde ve bazı alanlarda glandüler mimari gösteren infiltratif karakterde malign tümöral infiltrasyon izlendi. İmmünohistokimyasal analizde tümöral alanlarda TTF-1: pozitif, NapsinA: pozitif, Sitokeratin-19: pozitif ekspresyon izlenirken Tiroglobulin, HBME-1, p40 ve Kalsitonin ile herhangi bir ekspresyon saptanmadı. Mevcut bulgularla olgu “Malign epiteliyal tümör infiltrasyonu-Akciğer adenokarsinoma metastazı ile uyumlu” şeklinde raporlandı.

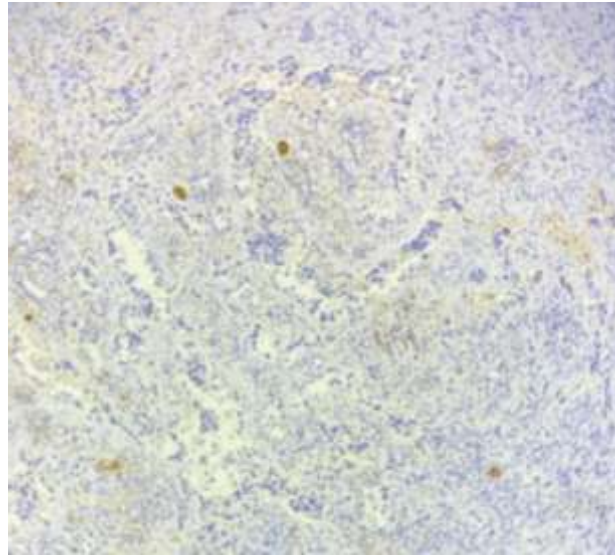
Mevcut olgumuzda tümör tiroidin hemen tamamını infiltre etmişken ekstratiroidal alan ve rezeksiyon cerrahi sınırda da devam etmekteydi. Ayrıca kan damarı ve lenfatik invazyon da mevcuttu. Perinöral invazyon izlenmedi. Ayrıca beraberinde gönderilen trakea önü santral yerleşimli 2 adet lenf düğümü de metastatik lenf düğümü lehine değerlendirilmiş olup bu lenf düğümlerinde ekstrakapsüler yayılım mevcuttu.



Resim 10. Tiroid folikülleri arasında infiltratif karakterde hiperkromatik pleomorfik nükleuslu atipik karakterde epiteliyal hücrelerin meydana getirdiği tümöral infiltrasyon (x10, HE), Resim 11. Farklı alanlardaki aynı karakterde tümöral infiltrasyon (x10, HE)



Resim 12. TTF-1 ile tümöral hücrelerde pozitif nükleer ekspresyon (x10, İHK), Resim 13. NapsinA ile tümöral hücrelerde pozitif sitoplazmik ekspresyon (x10, İHK)



Resim 14. Tiroglobulin ile tümöral hücrelerde ekspresyon izlenmedi (x20, İHK)

SONUÇ VE TARTIŞMA

Tiroid bezinde metastatik tümörler nadirdir ve otopsi çalışmalarında genel prevalansı %5,9'dur. Son klinik serilerde, ikincil tiroid kanseri malign tiroidlerin sadece %1,9'unda görülmektedir. Genel olarak (kadın-erkek oranı 1,07:1) ve yaygın histolojik tiplere (renal hücreli karsinom, akciğer adenokarsinomu ve kolorektal adenokarsinom) göre sınıflandırıldığında cinsiyet ayrımı yoktur. Büyük

çalışmalarda metastatik tiroid tümörü tanısı konulan hastaların medyan yaşı 54-68 arasında değişmektedir. Metastazlar, önceden var olan veya eş zamanlı tiroid patolojisi olan hastalarda daha sık görülür. Otopsi çalışmalarında en yaygın primer bölgeler meme karsinomu ve akciğer karsinomudur. Klinik serilerde ise böbrek hücreli karsinom, akciğer karsinomu ve meme karsinomu baskındır. Histolojik alt tipin sıklığı, coğrafi yaygınlık ve primer kanserin agresifliği, tiroid bezinde metastaz insidansına muhtemel katkıda bulunur. Bu durum, mide ve özofagus primer kanserlerinin baskın olduğu Asya'dan gelen vaka serilerinde görülmektedir. Sekonder tiroid kanseri metakronik (%60), senkron (%34) veya altta yatan kanserin ilk belirtisi (%6) olarak ortaya çıkabilir. Geç metastazlar ve hastalığın ilk klinik belirtileri genellikle böbrek hücreli karsinomlardan kaynaklanırken, senkron vakalar akciğerlerden kaynaklanma eğilimindedir. Nadir olmasına rağmen, sekonder tiroid kanseri, özellikle böbrek, akciğer veya meme gibi daha önce tanısı olan hastalarda ayırıcı tanı olarak düşünülmelidir. Melanom, melanom dışı deri kanserlerine kıyasla daha düşük insidansa sahip olmasına rağmen, tiroid bezine metastaz yapan en yaygın deri kanseri türüdür. Tiroid bezine metastaz yaptığı bilinen akciğer tümörleri arasında en yaygın olanı küçük hücreli olmayan akciğer kanseridir.

Daha önce tiroid dışı malignite öyküsü olan hastalar, yaşamları boyunca yeni bir tiroid kitlesi veya nodülü ile başvurabilirler. Tek başına iyi huylu tiroid nodülleri, multinodüler guatr ve primer tiroid malignitesi en sık görülen tanılar olsa da, tiroid bezine metastazlar da göz önünde bulundurulmalıdır. Metastazlar, tüm tiroid malignitelerinin yaklaşık %1,4 ila %3'ünü oluşturur ve otopsi çalışmalarında, incelemenin kapsamlılığına bağlı olarak, görülme sıklığı %1,9 ila %24'e kadar yükselir. İkincil tiroid maligniteleri, özellikle primer kanserin teşhis ve tedavisinden yıllar sonra ortaya çıkarsa, sıklıkla tanısız bir sorun teşkil eder. Malign tümörlerin uzun süreli takibi için pozitron emisyon tomografisi-bilgisayarlı tomografi (PETCT) çağında, tiroid nodülleri tespit edilir ve bunların primer mi yoksa metastatik neoplazm mı olduğu belirlenmelidir. Uygun tedavi tartışmalıdır, ancak metastatik tiroid hastalığının cerrahi rezeksiyonu sağkalım avantajı sağlayabilir.

Tiroid bezine metastaz saptandığında klinisyenler için en önemli soru, tiroidektominin prognozu iyileştirip iyileştirmeyeceğidir. Minnesota, Rochester'daki Mayo Kliniği'nde 30 yıllık bir dönemde tiroid bezine metastatik kanserli 97 hastayı içeren vaka serisinde en sık görülen primer tümör bölgeleri arasında 21 hastada (%22) böbrek, 21 hastada (%22) akciğer, 12 hastada (%12) baş ve boyun ve 11 hastada (%11) meme yer almaktadır. Daha az sıklıkla metastazlar özofagus (%9), deri (%7), nöroendokrin (%5) ve endometrium/over (%3) kaynaklı olmuştur. Olağandışı bölgeler arasında bir vakada timik karsinoid ve bir diğerinde spinal kordoma bulunmaktadır. Ayrıca, 1 hastada tiroid bezine metastaz yapmış kolon karsinomu mevcuttu.

Tiroid bezine metastazın en eski tanımı, 1871'de testis tümörü metastazını tanımlayan Virchow'a atfedilir. Bezdeki yoğun kan akışı göz önüne alındığında, tiroide metastazların düşük görülme sıklığı şaşırtıcıdır. Willis, bunun bezin mikroortamından etkilendiğini öne sürmüştür; hızlı arteriyel kan akışı ve yüksek oksijen ve iyot konsantrasyonu, dolaşımdaki tümör hücrelerinin tutunmasını ve ikincil büyümesini önleyebilir. Otopsi incelemeleri, tiroid dışı malignitelerden ölen hastaların %24'ünde bu beze metastaz olduğunu gösterse de, bunlar klinik uygulamada nadir görünmektedir. Tiroid metastazı ile başvuran hastaların çoğunluğu (%60-80) bilinen önceki bir malignite bağlamında teşhis edilse de, gizli bir primer tümör önemli bir yüzdeyi (%20-40) oluşturmaktadır.

Otopsi serilerinde genel olarak metastaz insidansı %2'dir. Otopsi serilerinde primer tümörün en yaygın yeri akciğer iken, klinik serilerde böbrek hücreli karsinom (RCC) daha yaygındır. Akciğer malignitelerinin agresif doğası nedeniyle, hastalar genellikle erken evreden itibaren palyatif amaçla tedavi edilir ve bu nedenle ek metastaz araştırması kısıtlanır. Buna karşılık, RCC daha az agresiftir ve hastaların metastatik hastalık için daha fazla araştırılması ve tedavi edilmesi daha olasıdır. Tiroid bezine metastaz, bazı serilerde bildirildiği gibi, laringe veya üst özofagusta lokal olarak agresif hastalığın tiroid bezine doğrudan infiltrasyonu ile karıştırılmamalıdır.

Tiroid bezindeki metastatik lezyonların çoğu, primer tümörlerin saptanmasından kısa bir süre sonra ortaya çıkmıştır (ortalama latent dönem, 53 ay). İlk primer tanıdan tiroid metastazlarının saptanmasına kadar geçen süre bir çalışmada böbrek hücreli karsinomu olanlarda en uzun (ortalama 113 ay; aralık, 3 ay ila 20 yıl) ve hepatobiliyer sistemin nöroendokrin malignitesi olan hastada en kısa (ortalama 2 ay) olmuştur. Rezeke edilen lezyonlar genellikle multifokal veya multinodüler olmaktan ziyade unifokal bulunmuştur. Sonuç olarak tiroid nadir de olsa metastaz alabilen bir organdır. Primer tanısı bulunan olgularda ayırıcı tanıda metastazlar da mutlaka akılda tutulmalıdır.

KAYNAKÇA

- Nguyen, M., He, G., & Lam, A. K.-Y. (2022). An update on the current epidemiological status of metastatic neoplasms to the thyroid. *Cancer Epidemiology*, 79, 102192. <https://doi.org/10.1016/j.canep.2022.102192>
- Hegerova, L., Griebeler, M. L., Reynolds, J. P., Henry, M. R., & Gharib, H. (2015). Metastasis to the thyroid gland. *American Journal of Clinical Oncology*, 38(4), 338–342. <https://doi.org/10.1097/COC.0b013e31829d1d09>
- Nixon, I. J., Coca-Pelaz, A., Kaleva, A. I., Triantafyllou, A., Angelos, P., Owen, R. P., Rinaldo, A., Shaha, A. R., Silver, C. E., Ferlito, A., & Zafereo, M. E. (2017). Metastasis to the thyroid gland: A critical review. *Annals of Surgical Oncology*, 24, 1533–1539. <https://doi.org/10.1245/s10434-016-5683-4>
- Ishikawa, M., Hirano, S., Tsuji, T., & Ito, J. (2011). Management of metastasis to the thyroid gland. *Auris Nasus Larynx*, 38(3), 426–430. <https://doi.org/10.1016/j.anl.2010.11.009>

Peri-implantitis Tedavisinde UV-Kürlenebilen Melatonin Yüklü Hidrojeller: Formülasyon ve Karakterizasyon

Bilge Eylül ŞENTÜRK¹, Esra KARATAŞ¹², Hatice Yeşim KARASULU

¹E-mail: bilge eylul.senturk@ege.edu.tr; Ege Üniversitesi, Eczacılık Fakültesi, Farmasötik Teknoloji Ana Bilim Dalı, İzmir / Türkiye.

²E-mail: esra.karatas@ege.edu.tr; Ege Üniversitesi, Atatürk Sağlık Hizmetleri Yüksekokulu, Eczane Hizmetleri Bölümü, İzmir/ Türkiye.

¹E-mail: yesim.karasulu@ege.edu.tr; Ege Üniversitesi, Eczacılık Fakültesi, Farmasötik Teknoloji Ana Bilim Dalı, İzmir / Türkiye.

Özet

Peri-implantitis, diş implantlarının çevresindeki dokuları etkileyen; bağ dokusu iltihabı ve destek kemiğinde ilerleyici erime ile kendini gösteren bir hastalıktır. Bu çalışmada, peri-implantitis tedavisinde kullanılmak üzere fotokürlenebilir ve enjekte edilebilir melatonin yüklü HAMA hidrojelleri başarıyla üretilmiş ve karakterize edilmiştir. Melatonin ve foto-başlatıcı (LAP) eklenen %1'lik HAMA çözeltisi, 405 nm UV lamba ile 1 cm mesafeden 10-30 jelleştirilmiştir. Formülasyonun 21G iğne ile enjekte edilebilirliği doğrulanmış; 25°C'de reolojik analizleri ve mekanik özellikleri (sertlik, sıkıştırılabilirlik, adezivlik, kohezivlik, ve elastiklik) incelenmiş ve pH değeri 7.12±0.01 olarak saptanmıştır. Peri-implantitis tedavisi için enjekte edilebilir, düşük invazivliğe sahip ve destekleyici alternatif bir dozaj formu başarıyla üretilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Peri-implantitis, Foto Kürlenebilen Jel, Melatonin, HAMA

Abstract

Peri-implantitis is a pathological condition affecting the tissues surrounding dental implants, characterized by connective tissue inflammation and the progressive resorption of supporting bone. In this study, photocurable and injectable melatonin containing HAMA hydrogels were successfully developed and characterized for the treatment of peri-implantitis. A 1% HAMA solution, prepared with melatonin and a photoinitiator (LAP), was subjected to photopolymerization using a 405 nm UV light source at a distance of 1 cm for 10-30 seconds. The injectability of the formulation via a 21-gauge (21G) needle was confirmed. Furthermore, rheological behavior and mechanical properties (specifically hardness, compressibility, adhesiveness, cohesiveness, and elasticity) were evaluated at 25°C, and the pH of the formulation was determined as 7.12 ± 0.01. In conclusion, an injectable, minimally invasive, and adjunctive alternative dosage form was successfully formulated for the therapeutic management of peri-implantitis.

Keywords: Peri-implantitis, Photocurable Gels, Melatonin, HAMA

GİRİŞ

Peri-implantitis, diş implantlarının etrafındaki dokularda meydana gelen, bağ dokusunda iltihaplanma ve destekleyici kemiğin ilerleyici kaybı ile karakterize edilen patolojik bir durumdur (Schwarz, Derks, Monje, & Wang, 2018). Peri-implantitisin önlenmesi ve tedavisine yönelik yöntemler arasında modifiye yüzeyli implantların kullanılması, ağız bakım uzmanı tarafından 6 aylık takip ve destek seansları, fotodinamik terapi ve kemik rejenerasyonu bulunmaktadır (Chen et al., 2019).

Melatoninin osteoblastik farklılaşma üzerindeki etkisine dair mevcut bir çalışma; molekülün BMP/ERK/Wnt yolları üzerinden MC3T3-E1 hücrelerinde mineralizasyonu artırdığını ve kemik hastalıkları için potansiyel, güçlü bir osteojenik ajan olduğunu kanıtlamaktadır (Park et al., 2011). Hyaluronik asit metakrilat (HAMA), hyaluronik asidin (HA) kimyasal yollarla modifiye edilmiş bir türevidir. Bu yapıda, HA polimer omurgasına metakrilat gruplarının entegre edilmesi, materyalin kimyasal veya fotokimyasal yöntemlerle çapraz bağlanabilmesine olanak tanır (Golrokhian et al., 2025).

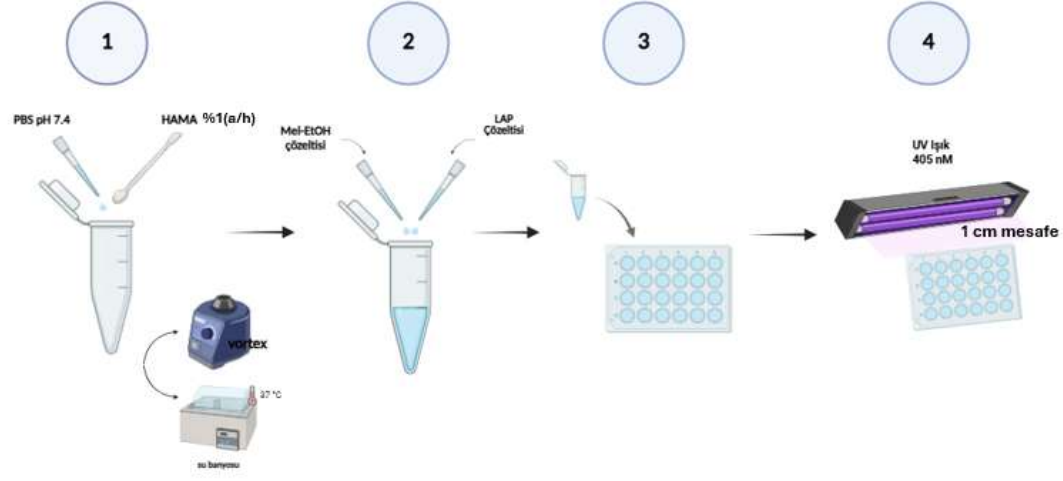
Enjekte edilebilir hidrojel, kolay uygulanabilen yapıları sayesinde peri-implantitisin tedavisinde minimal derecede invaziv ve destekleyici bir tedavi yaklaşımı olarak karşımıza çıkmaktadır. Yüksek akışkanlıkları sayesinde düzensiz şekilli periodontal cepleri etkili bir şekilde doldurabildikleri için cerrahi olmayan periodontal tedavilerde taşıyıcı olarak sıklıkla tercih edilmektedir. Bu hidrojellerin osteogenezi teşvik etme, inflamasyonu azaltma ve hücre göçünü artırma potansiyeli, dental implantlar etrafındaki doku bütünlüğünün yeniden sağlanması açısından büyük bir umut vadetmektedir (Feili et al., 2026; Liu et al., 2024)

Bu çalışmada melatonin içeren foto kürlenebilir özelliğe sahip HAMA hidrojel, hazırlanmış ve karakterizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

YÖNTEM

Çalışma kapsamında tasarlanan hidrojellerin üretimi için, öncelikle HAMA polimeri fosfat tamponlu salin pH 7.4 (PBS) içerisinde çözülerek %1 (a/h) konsantrasyonunda çözelti elde edilmiştir. Sulu ortamlarda düşük çözünürlük profiline sahip olan melatonin formülasyona öncelikle uygun hacimde etanol içerisinde çözündürülmüş ve HAMA çözeltisine ilave edilmiştir. Fotokürlenmenin sağlanması amacıyla, foto-başlatıcı ajan olarak lityum fenil-2,4,6-trimetilbenzoilfosfinat (LAP) çözeltisi karışıma dahil edilmiştir. Hazırlanan nihai prejel formülasyonu, 405 nm dalga boyunda bir ışık kaynağı kullanılarak fotopolimerizasyon işlemine tabi tutulmuştur. Polimer ağının homojenliğini ve kontrollü jelasyon sürecini için, ışık kaynağı ile prejel yüzeyi arasındaki mesafe 1 cm olarak sabitlenmiş ve 10-30 saniye aralığında jelasyon süresi optimize edilmiştir. Üretim yöntemi Şekil 1’de verilmiştir.

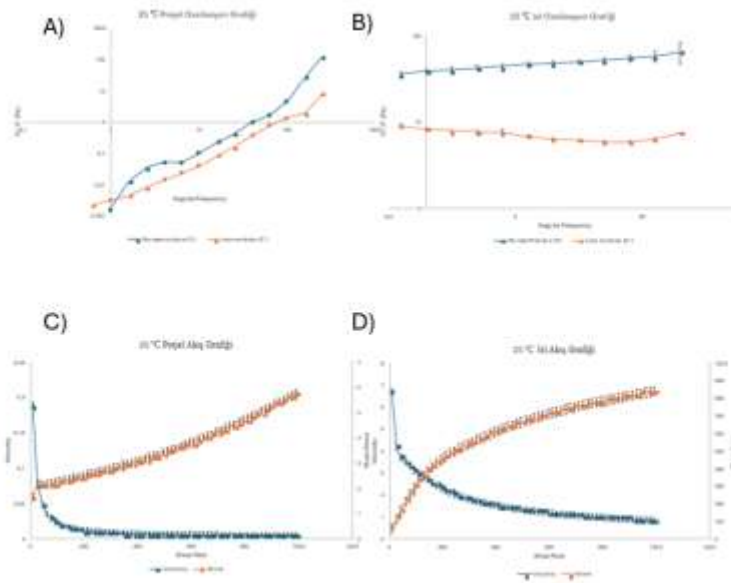
Elde edilen jel formülasyonunun yapısal uygunluğunu doğrulamak amacıyla karakterizasyon testleri yürütülmüş olup; bu süreçte reolojik ölçümler, mekanik özellik analizleri ve pH tayini gerçekleştirilmiştir.



Şekil 1. Hidrojel üretim yöntemi

BULGULAR

Hazırlanan perjel ve jel formülasyonlarına ait akış özellikleri ve osilasyon grafikleri $25^{\circ}\text{C} \pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 'de reometre cihazı (TA-TX Discovery HR 1) ile belirlenmiştir. İlgili grafikler Şekil 2 'de verilmiştir.



Şekil 2. Reoloji analizi sonuçları; A) Prejel Osilasyon Grafiği; B) Jel Osilasyon Grafiği; C) Prejel Akış Grafiği; D) Jel Akış Grafiği

Hazırlanan formülasyona ait sertlik, adeziflik, koheziflik, sıkışabilirlik ve elastikiyet gibi mekanik özellikler incelenmiştir. Mekanik özellik tayini TA-TX Plus Texture Analyser cihazı ile gerçekleştirilmiştir ve elde edilen değerler Tablo 1’de gösterilmiştir.

Tablo 1. *Mekanik özellik sonuçları*

F1-Jel	Sıkışabilirlik	Adeziflik	Sertlik	Koheziflik	Elastikiyet
Ortalama	0.054	1.165	0.027	1.129	1.048
STD sapma	0.003	0.196	0.002	0.070	0.045

Hazırlanan formülasyona ait pH sonuçları Tablo 2’de gösterilmiştir.

Tablo 2. *Geliştirilen formülasyona ait pH sonuçları*

Jel pH	7.13
	7.11
	7.11
Ortalama	7.12
STD sapma	0.01

SONUÇ VE TARTIŞMA

Geliştirilen UV ile kürlenebilen hidrojel sisteminin reolojik ve mekanik karakterizasyon sonuçları incelendiğinde, prejelin enjekte edilebilir uygulamalar için ideal bir profil sergilediği görülmektedir. Reolojik veriler, prejelin düşük viskoziteli yapısı sayesinde şırıngadan minimum dirençle kolayca enjekte edilebildiğini; kürlenme sonrasında ise Lineer viskoelastik bölgede depo modülün kayıp modülü belirgin şekilde aşarak stabil ve mekanik açıdan güçlü bir 3 boyutlu ağ yapısına dönüştüğünü göstermektedir. Jel formunun (shear-thinning) davranışı, yüksek kayma kuvvetleri altında viskozitenin azalmasına olanak tanıyarak formülasyonun uygulama kolaylığını göstermektedir; bu sonuçlar Mekanik Analiz sonuçlarıyla da desteklenmektedir. Elde ettiğimiz yüksek koheziflik (1.129)

ve elastikiyet (1.048) değerleri jelin dış kuvvetlere karşı iç bütünlüğünü koruyarak formunu geri kazanabildiğini, belirgin adezivlik değeri (1.165) ise hedef dokuya/yüzeye güçlü bir şekilde tutunabileceğini göstermektedir. Mine ve dentin dokularının güvenliği açısından, formülasyonların pH seviyesinin nötr değerlere (6.7 ve üstü) yakın tutulması esastır; nitekim savunmasız diş köklerinin asidik ajanlara uzun süreli maruziyeti erozyon riskini ciddi oranda artırmaktadır. Formülasyonun pH değeri 7.12 olarak ölçülmüştür; bu değer literatür ile uyumlu bulunmuştur (Delgado & Olafsson, 2017). Prejelin 21G iğne ucundan rahatlıkla enjekte edilebildiği bulunmuştur. Bu sonuç reolojik ve mekanik özelliklerle uyumludur.

Sonuç olarak, fotokürlenebilir, enjekte edilebilir jeller üretilmiş ve karakterizasyon çalışmaları tamamlanmıştır. Peri-implantitis tedavisinde invazivliği düşük, destekleyici, alternatif bir dozaj formu şekli sunulmuştur.

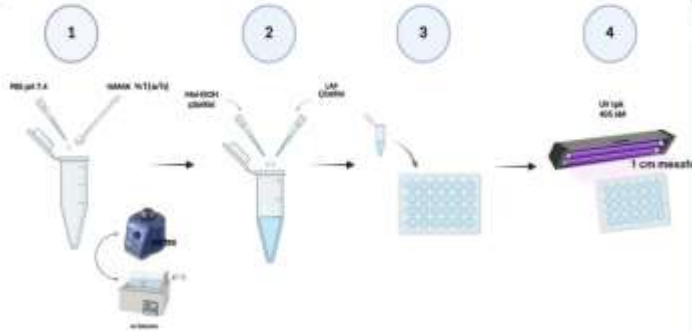
KAYNAKÇA

- Chen, W., Zhi, M., Feng, Z., Gao, P., Yuan, Y., Zhang, C., ... Dong, A. (2019). <p>Sustained co-delivery of ibuprofen and basic fibroblast growth factor by thermosensitive nanoparticle hydrogel as early local treatment of peri-implantitis</p>. *International Journal of Nanomedicine*, Volume 14, 1347–1358. doi:10.2147/IJN.S190781
- Delgado, A. J., & Olafsson, V. G. (2017). Acidic oral moisturizers with pH below 6.7 may be harmful to teeth depending on formulation: a short report. *Clinical, Cosmetic and Investigational Dentistry*, Volume 9, 81–83. doi:10.2147/CCIDE.S140254
- Feili, F., Valadbeigi, H., Negahdari, B., Khooshnod, S., Maleki, A., & Haddadi, M. H. (2026). Injectable hydrogel and its potential therapy for peri-implantitis. *International Journal of Polymeric Materials and Polymeric Biomaterials*, 75(3), 285–301. doi:10.1080/00914037.2025.2543363
- Golrokhian, M., Fakhimi Rezaei, H., Rezaeianjam, M., Moslem, B., Naderpour, K., & Seraji, A. A. (2025). Recent advances and clinical potential of hyaluronic acid methacrylate (HAMA)/ceramic composites in oral and dental regenerative therapies: A comprehensive review. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 192, 118590. doi:10.1016/j.biopha.2025.118590
- Liu, Y., Wei, X., Yang, T., Wang, X., Li, T., Sun, M., ... Luo, Y. (2024). Hyaluronic acid methacrylate/Pluronic F127 hydrogel enhanced with spermidine-modified mesoporous polydopamine nanoparticles for efficient synergistic periodontitis treatment. *International Journal of Biological Macromolecules*, 281, 136085. doi:10.1016/j.ijbiomac.2024.136085
- Park, K.-H., Kang, J. W., Lee, E.-M., Kim, J. S., Rhee, Y. H., Kim, M., ... Hoon Kim, S. (2011). Melatonin promotes osteoblastic differentiation through the BMP/ERK/Wnt signaling pathways. *Journal of Pineal Research*, 51(2), 187–194. doi:10.1111/j.1600-079X.2011.00875.x

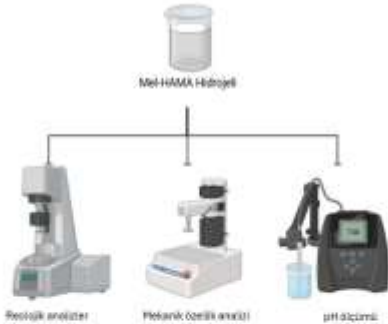
GİRİŞ

Peri-implantitis, diş implantlarının etrafındaki dokularda meydana gelen, bağ dokusunda iltihaplanma ve destekleyici kemiğin ilerleyici kaybı ile karakterize edilen patolojik bir durumdur.¹ Peri-implantitisin önlenmesi ve tedavisine yönelik yöntemler arasında modifiye yüzeyli implantların kullanılması, ağız bakım uzmanı tarafından 6 aylık takip ve destek seansları, fotodinamik terapi ve kemik rejenerasyonu bulunmaktadır.² Melatoninin osteoblastik farklılaşmaya olan etkisi üzerine çalışmalar bulunmaktadır.³ Enjekte edilebilir hidrojeller, kolay uygulanabilir yapıları sayesinde peri-implantitisin tedavisinde minimal derecede invaziv ve destekleyici bir tedavi yaklaşımı olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu hidrojellerin osteogenezi teşvik etme, inflamasyonu azaltma ve hücre göçünü artırma potansiyeli, dental implantlar etrafındaki doku bütünlüğünün yeniden sağlanması açısından büyük bir umut vadetmektedir.⁴

GEREÇ VE YÖNTEM



Şekil 1. Melatonin İçeren Hidrojel Formülasyonlarının Hazırlanması



Şekil 2. Gerçekleştirilen Karakterizasyon Çalışmaları

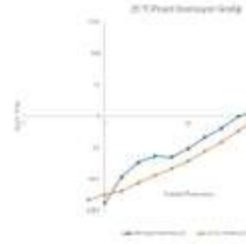
KAYNAKÇA

- Schwarz, F., Derks, J., Morje, A., & Wang, H. (2018). Peri-implantitis. *Journal of Periodontology*, 89(S1). <https://doi.org/10.1002/JPER.16-0350>
- Chen, W., Zhi, M., Feng, Z., Gao, P., Yuan, Y., Zhang, C., Wang, Y., & Dong, A. (2019). <p>Sustained co-delivery of ibuprofen and basic fibroblast growth factor by thermosensitive nanoparticle hydrogel as early local treatment of peri-implantitis</p>. *International Journal of Nanomedicine*, Volume 14, 1347-1358. <https://doi.org/10.2147/IJN.S190781>
- Park, K.-H., Kang, J. W., Lee, E.-M., Kim, J. S., Rhee, Y. H., Kim, M., Jeong, S. J., Park, Y. G., & Hoon Kim, S. (2011). Melatonin promotes osteoblastic differentiation through the BMPERK/Wnt signaling pathways. *Journal of Pineal Research*, 51(2), 187-194. <https://doi.org/10.1111/j.1600-979X.2011.00875.x>
- Felli, F., Valadbeigi, H., Negahdani, B., Khooshnood, S., Maleki, A., & Haddadi, M. H. (2025). Injectable hydrogel and its potential therapy for peri-implantitis. *International Journal of Polymeric Materials and Polymeric Biomaterials*, 75(3), 285-301. <https://doi.org/10.1080/00914037.2025.2543383>

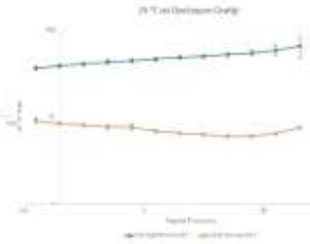
BULGULAR

1. Reolojik Analizler:

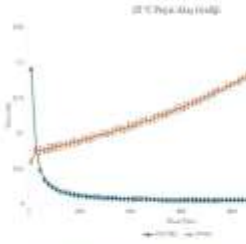
25 °C Prejel Ossilasyon Grafiği



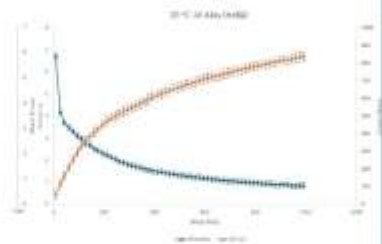
25 °C Jel Ossilasyon Grafiği



25 °C Prejele Ait Akış Grafiği



25 °C Jele Ait Akış Grafiği



2. Mekanik Özellik Analizleri:

Tablo 1. Jele ait Mekanik Özellikler

	F1-Jel	Sıkışabilirlik	Adeziflik	Sertlik	Koheziflik	Elastikiyet
Ortalama		0.054	1.165	0.027	1.129	1.048
STD sapma		0.003	0.196	0.002	0.070	0.045

3. pH Ölçümü

Tablo 2. Jele ait pH sonuçları

Jel pH	7.13
	7.11
	7.11
Ortalama	7.12
STD sapma	0.01

Hazırlanan prejel formülasyonun 21G iğne ucundan rahatlıkla enjekte edilebildiği bulunmuştur.

SONUÇ

Karakterizasyon çalışmaları sonunda UV ile kürlenebilen melatonin içeren jellerin başarıyla oluşturulduğu belirlenmiştir. Elde edilen veriler ışığında, peri-implantitis tedavisinde kullanılmak üzere alternatif bir dozaj formu sunulmuştur.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Ege Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Proje Koordinatörlüğü tarafından 32743 numaralı proje ile desteklenmektedir.

Radyolojik Görüntülerde Periodontal Kemik Kaybının Yapay Zeka ile Tespiti: Güncel Bir Değerlendirme

Erengül KANAT¹, Hülya ÇAKIR KARABAŞ²

¹E-mail: erengul.kanat@ogr.iu.edu.tr; İstanbul Üniversitesi, Diş Hekimliği Fakültesi, Ağız, Diş ve Çene Radyolojisi Bölümü, İstanbul/ Türkiye.

²E-mail: hulya.cakirkarabas@istanbul.edu.tr; İstanbul Üniversitesi, Diş Hekimliği Fakültesi, Ağız, Diş ve Çene Radyolojisi Bölümü, İstanbul/ Türkiye.

Özet

Periodontal hastalıklar toplumda sıklıkla görülen, diş etleri ile başlayıp çevre dokulara yayılan kronik hastalıklardır. Diabetes mellitus, ateroskleroz, erken doğum gibi diğer sistemik durumlarla ilişkisi bulunmuştur. Oral hijyen eksikliği, genetik faktörler, cinsiyet, sigara kullanımı, sistemik hastalıklar hastalık için risk oluşturan başlıca etmenlerdir. Tanısı klinik ve radyolojik olarak konulmaktadır. Klinikte diş eti renk değişimleri, ödematöz kanamalı diş eti dokuları, sondalamada artmış diş eti cep derinlikleri tanı koymada değerlendirilen kriterlerdendir. Radyolojik değerlendirme, kemik seviyelerinin değerlendirilmesi ile yapılmakta olup periapikal, bitewing, panoramik ve konik ışınli bilgisayarlı tomografi faydalanılan başlıca röntgen tipleridir. Son yıllarda, tıp alanında (ör: meme kanseri taramalarında kullanılan mamografilerde, diyabetik retinopati muayenesinde kullanılan retinal fundus fotoğraflarında vb.) ve diş hekimliğinde tanı sürecinde yapay zekadan faydalanılmaktadır. Çalışmamızda periodontal hastalığı olan bireylerde periodontal kemik kaybının radyolojik tanılmasında yapay zeka modellerinin kullanıldığı çalışmalar derlenmiştir. Değerlendirilen çalışmalar yapay zeka modelleri ile yapılan periodontal kemik kaybı tespitlerinin yüksek doğruluk ve duyarlılık oranları sunduğunu göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: yapay zeka, periodontal kemik kaybı, radyoloji

Abstract

Periodontal diseases are chronic conditions commonly observed in the population, beginning in the gingival tissues and spreading to the surrounding structures. They have been associated with various systemic conditions such as diabetes mellitus, atherosclerosis, and preterm birth. Poor oral hygiene, genetic factors, gender, smoking, and systemic diseases are among the main risk factors for the disease. The diagnosis is made through clinical and radiological evaluation. Clinically, changes in gingival color, edematous and bleeding gingival tissues, and increased probing pocket depths are key criteria used for diagnosis. Radiological assessment is performed by evaluating bone levels, and the main imaging modalities include periapical, bitewing, panoramic radiographs, and cone beam computed tomography. In recent years, artificial intelligence has been utilized in the diagnostic

process in both medicine (e.g., mammography used in breast cancer screening, retinal fundus images used in diabetic retinopathy examination, etc.) and dentistry. In our study, we reviewed studies in which artificial intelligence models were used for the radiological diagnosis of periodontal bone loss in individuals with periodontal disease. The evaluated studies have shown that periodontal bone loss detection performed using artificial intelligence models offers high accuracy and sensitivity rates.

Keywords: artificial intelligence, periodontal bone loss, radiology

GİRİŞ

Yaygın periodontal hastalıklardan biri olan periodontitis; oral biyofilm kaynaklı, kronik inflamatuvar ilerleyişli, gingival inflamasyonla, alveolar kemik ve diş kaybıyla karakterize bir hastalıktır (Lee vd., 2024). Periodontitisli bireyler çoklu diş kayıpları, dişsizlik, çiğneme disfonksiyonları açısından risk altında olup buna bağlı olarak beslenme bozuklukları, yaşam kalitesinin düşmesi, özsaygı azalması gibi durumlar yaşayabilmektedir. Aynı zamanda büyük sosyo-ekonomik etkilerle ve sağlık hizmeti maliyetleri ile karşılaşabilmektedir (Tonetti, Jepsen, Jin, & Otomo-Corgel, 2017).

Erken evrelerde periodontitis bulguları belirgin değildir, bu sebeple göz ardı edilebilir veya fark edilmeyebilir. Bu durum periodontitisin ilerlemesine, diş kayıplarına ve diğer sistemik hastalıkların (kardiyovasküler, respiratuvar sistem hastalıkları vb.) gelişmesine zemin hazırlayabilmektedir. Erken tanı ve evrelemeye dayalı, zamanında uygulanan tedaviler periodontal hastalığın kontrolü için büyük öneme sahiptir (Jiang vd., 2022).

Periodontal hastalıkların klinik tanısı, diş eti çekilmeleri ve sondalama derinlikleri ve bunların ölçümünden elde edilen bir parametre olan ataşman kaybının değerlendirilmesi ile yapılır (Preshaw, 2015). Fakat bu değerlendirmeler güvenilirlik açısından sınırlıdır (Krois vd., 2019).

Periapikal, panoramik, konik ışınli bilgisayarlı tomografi gibi radyolojik görüntüleme yöntemleri periodontitis ile ilişkili kemik kayıplarını belirlemede kullanılan yöntemlerdendir (Corbet, Ho, & Lai, 2009). Ancak çeşitli sebepler (çekim açısı, klinisyen becerisi, subjektivite vb.) radyografiler üzerinden periodontal kemik kayıplarını belirlemede değerlendiriciler arasında yetersiz doğruluk ve güvenilirliğe yol açabilmektedir (Jiang vd., 2022).

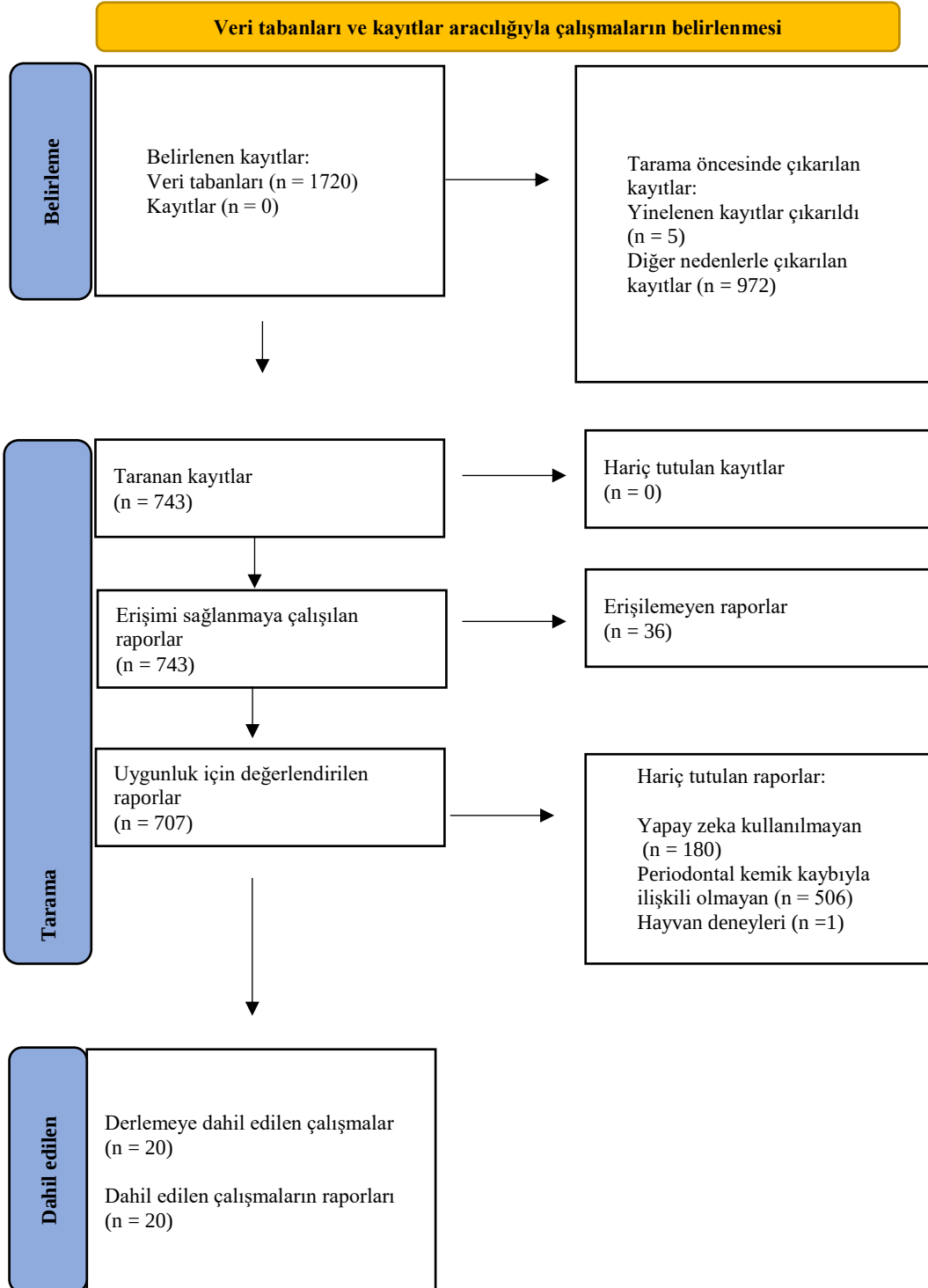
Son yıllarda yapay zeka alanında yaşanan gelişmeler, diş hekimliği ve tıbbın birçok alanına çeşitli yenilikler getirmiştir. Yapay zeka teknolojileri, radyolojik görüntüleri hızlı ve doğru bir şekilde değerlendirerek tanı sürecinde hekime yardımcı olmaktadır. Buna ek olarak değerlendirmelerin otomatikleştirilmesi ile klinikte zaman tasarrufu, tanısal doğruluk ve tutarlılık oranları artmaktadır.

Çalışmamız, yapay zeka ile radyolojik görüntüler (panoramik, periapikal, konik ışınli bilgisayarlı tomografi) üzerinden periodontal kemik kaybının tespiti ile ilgili yapılan çalışmaları değerlendirerek tanısal doğruluk ve tutarlılık oranlarını karşılaştırmayı hedeflemektedir.

YÖNTEM

Çalışmamızda, Pubmed ve Scopus veri tabanlarında “artificial intelligence”, “deep learning”, “machine learning”, “periodontitis”, “periodontal bone loss”, “alveolar bone loss”, “CBCT”, “cone beam computed tomography”, “panoramic radiography”, “periapical radiography”, “bitewing radiography” anahtar kelimeleri kullanılarak mevcut literatürün taraması yapılmıştır. Bu terimler Boolean arama metodu (AND, OR) kullanılarak kombinasyonlar halinde aranmıştır.

Pubmed 127 ve Scopus 1593 olmak üzere iki veri tabanından toplam 1720 çalışmaya ulaşılmıştır. Yinelenen 5 kayda ulaşılmıştır. Scopus’ta çalışma alanı diş hekimliği, tıp, bilgisayar bilimleri ve mühendislik dışında olan alanlar dışlanmış ve çalışma sayısı 1003’e düşürülmüştür. Belge tipi makale olmayan çalışmalar dışlanmış ve sayı 662’ye düşürülmüştür. Çalışma dili İngilizce olmayan çalışmalar elenerek taramaya alınacak çalışma sayısı 628 olarak belirlenmiştir. Pubmed veri tabanından ise elde edilen 127 çalışma İngilizce yayınların çalışmaya dahil edilmesiyle 122’ye, tam metinlerin dahil edilmesiyle 120’ye düşürülmüştür. Yinelenen 5 kayıt çıkarılarak iki veri tabanından yapılan tarama öncesi elemelerle 743 çalışma taranmaya alınmıştır. 36 makaleye tam erişimin olmaması sebebiyle değerlendirme dışı tutulmuş ve 707 makale değerlendirmeye alınmıştır. 707 makaleden; yapay zeka sistemlerinin kullanılmadığı 180, periodontal kemik kaybıyla ilgisi olmayan 506, hayvan deneylerinin yapıldığı 1 çalışma değerlendirme dışı tutulmuş ve nihayetinde toplam 20 makale çalışmamıza dahil edilmiştir.



BULGULAR

İncelemeye dahil edilen çalışmalar; görüntüleme yöntemlerine ve kullanılan yapay zeka modellerine göre gruplandırılmıştır. 20 çalışmanın 1'i konik ışınli bilgisayarlı tomografi, 3'ü periapikal radyografi, 1'i bitewing radyografi, 1'i hem periapikal hem bitewing radyografi, 14'ü panoramik radyografi olmak üzere farklı radyolojik metotları yapay zeka ile eşleştirmiştir.

Çalışma sonuçlarından elde edilen performans metrikleri tablo halinde sunulmuştur. Yapılan çalışmaların ağırlıklı olarak panoramik radyografiler üzerinden yapıldığı görülmüş olup aynı yapay zeka modeli kullanılarak yapılan çalışmalar kendi içinde kıyaslanarak farklı iki tablo halinde sunulmuştur.

Panoramik radyografi ile yapılan çalışmalarda, ağırlıklı olarak CNN(Convolutional Neural Network) yapay zeka modeli kullanıldığı görülmüş olup (Kao, Tseng, Tsai, & Huang, 2025; Krois vd., 2019)'nin çalışmalarında kullanılan CNN(Convolutional Neural Network) mimarisi açıkça belirtilmemiştir.

YOLOv8 ile yapılan 2 panoramik radyografi çalışmasında (Putra vd., 2025) 500 veri seti kullanırken, (Jundaeng, Chamchong, & Nithikathkul, 2025) 2000 veri seti kullanmıştır.

Periapikal radyografi teknikleri ile yapılan 4 çalışmada farklı yapay zeka modelleri kullanılmıştır.

Bitewing radyografi çalışması 2 olup farklı yapay zeka modelleri kullanılarak hazırlanmıştır.

Konik ışınli bilgisayarlı tomografi ile yapılan çalışma sayısı yalnızca 1 olup doğruluk ve tutarlılık açısından karşılaştırma yapılabilecek başka bir çalışma bulunmamaktadır.

Tablo 1. Yapılan çalışmaların karşılaştırılması

		Görüntüleme Yöntemi	Yapay Zeka Modeli	Doğruluk	Duyarlılık	Özgüllük	Kesinlik	F1 Skoru
(Kurt 2020)	vd.,	Panoramik radyografi	CNN(Google Inception v3)	0.9143	0.9429	0.8857	0.8919	0.9167
(Amasya 2024)	vd.,	Panoramik radyografi	Çoklu öğrenme modeli (Mask R-CNN, Cascade R-CNN, ResNet-101 backbone)	0.980	0.999	-	0.971	0.985
(Kao 2025)	vd.,	Panoramik radyografi	CNN(Convolutional Neural Network)	0.904	-	-	-	-
(Yu 2024)	vd.,	Panoramik radyografi	SegFormer model	-	0.7416	-	0.7722	0.7444
(Yadalam, Pawar, Natarajan, & Ardila, 2025)		Panoramik radyografi	Hibrit öğrenme modeli	0.9871	0.9914	-	-	0.9892
(Jiang 2022)	vd.,	Panoramik radyografi	İki aşamalı öğrenme modeli (U-Net ve YOLOv4)	0.77	-	-	-	-
(Jundaeng vd., 2025)		Panoramik radyografi	YOLOv8 model	0.98	1.0	0.98	-	0.90

		Görüntüleme Yöntemi	Yapay Zeka Modeli	Doğruluk	Duyarlılık	Özgüllük	Kesinlik	F1 Skoru
(Kurt-Bayrakdar vd., 2024)		Panoramik radyografi	CNN(U-Net)	0.892	0.947	-	0.939	0.943
(Uzun Saylan vd., 2023)		Panoramik radyografi	YOLO-v5	-	0.75	-	0.76	0.76
(Putra vd., 2025)		Panoramik radyografi	YOLOv8	0.9027	0.9464	0.8094	0.9127	0.9298
(Ragab vd., 2025)		Panoramik radyografi	YOLOv7-M	-	0.871	-	0.917	0.925
(Krois 2019)	vd.,	Panoramik radyografi	CNN(Convolutional Neural Network)	0.76±0.06	0.92±0.02	0.63±0.14	-	0.78±0.04
(Kim, Lee, Song, & Jung, 2019)		Panoramik radyografi	CNN(DeNTNet-Baseline)	-	0.66	0.94	-	0.66
			CNN(DeNTNet-Balanced)	-	0.77	0.95	-	0.75
			CNN(DeNTNet-High Sensitivity)	-	0.87	0.90	-	0.71
			CNN(DeNTNet-High Specificity)	-	0.74	0.96	-	0.73
(Le, Mai, Tumur-Ulzii, Kim, & Oh, 2026)		Panoramik radyografi	YOLOv11	-	0.984	-	0.981	0.983
(Chen 2023)	vd.,	Periapikal radyografi	YOLOv5	0.97	-	-	-	-
(Dujic 2023)	vd.,	Periapikal radyografi	Vision Transformer model (ViT-base)	0.852	0.898	0.745	-	-

	Görüntüleme Yöntemi	Yapay Zeka Modeli	Doğruluk	Duyarlılık	Özgüllük	Kesinlik	F1 Skoru
		Vision Transformer model (ViT-large)	0.834	0.873	0.743	-	-
		Vision Transformer model (BEiT-base)	0.845	0.8990	0.719	-	-
		Vision Transformer model (BEiT-large)	0.848	0.913	0.699	-	-
		Vision Transformer model (DeiT-base)	0.842	0.896	0.715	-	-
(Hoss vd., 2023)	Periapikal radyografi	Çoklu CNN model (Convolutional Neural Network)					
		ResNet-18	0.828	-	-	-	-
		MobileNetV2	0.820	-	-	-	-
		ConvNeXT/small	0.839	-	-	-	-
		ConvNeXT/base	0.848	-	-	-	-
		ConvNeXT/large	0.842				
(AlGhaihab vd., 2025)	Periapikal radyografi	CNN(Convolutional Neural Network)	0.81	0.76	0.86	-	-
	Bitewing radyografi	CNN(Convolutional Neural Network)	0.76	0.65	0.90	-	-
(Cassiano vd., 2025)	Bitewing radyografi	YOLOv8	-	0.739	-	0.611	0.6689
(Kurt-Bayrakdar vd., 2025)	Konik ışınli bilgisayarlı tomografi	Çok aşamalı derin öğrenme modeli (nn U-net ve TensorFlow/Keras)	0.99	0.60	0.99	0.55	-

Tablo 2. *Panoramik radyografilerde CNN model kullanılarak yapılan çalışmaların kıyaslanması*

	Yapay zeka modeli	Doğruluk	Duyarlılık	Özgüllük	Kesinlik	F1 Skoru
(Kurt vd., 2020)	CNN(Google Net Inception v3)	0.9143	0.9429	0.8857	0.8919	0.9167
(Kao vd., 2025)	CNN(Convolutional Neural Network)	0.904	-	-	-	-
(Krois vd., 2019)	CNN(Convolutional Neural Network)	0.76±0.06	0.92±0.02	0.63±0.14	-	0.78±0.04
(Kim vd., 2019)	CNN(DeNTNet-Baseline)	-	0.66	0.94	-	0.66
	CNN(DeNTNet-Balanced)	-	0.77	0.95	-	0.75
	CNN(DeNTNet-High Sensitivity)	-	0.87	0.90	-	0.71
	CNN(DeNTNet-High Specificity)	-	0.74	0.96	-	0.73
(Kurt-Bayrakdar vd., 2024)	CNN(U-Net)	0.892	0.947	-	0.939	0.943

Tablo 3. *Panoramik radyografilerde YOLOv8 model kullanılarak yapılan çalışmaların kıyaslanması*

	Doğruluk	Duyarlılık	Özgüllük	Kesinlik	F1 Skoru
(Putra vd., 2026)	0.9027	0.9464	0.8094	0.9127	0.9298

(Jundaeng vd., 0.98 2025)	1.0	0.98	-	0.90
------------------------------	-----	------	---	------

SONUÇ VE TARTIŞMA

Periapikal ve bitewing gibi intraoral radyografiler periodontal kemik kaybını incelemeye ilk başvuru radyolojik yöntemler olmasına rağmen incelenen çalışmalarda bu metotları kullanan çalışmaların sayısı az olduğu görülmüştür. Bu yöntemlerin görüntü alanının birkaç dişle sınırlı olması sebebiyle tüm ağız kadrantlarını görüntülemek için birden fazla film alınması gerekliliği (Amasya vd., 2024), çoklu film çekimini zorunlu kılmaktadır. Bu durum ise hastanın aldığı radyasyon dozunu artırmak ve hasta ile hekim açısından ek zaman gerektirmek gibi dezavantajları beraberinde getirmektedir. Bu da hekimleri tüm ağız görüntülemenin tek filmde yapılabildiği panoramik radyografi ve konik ışınli bilgisayarlı tomografi gibi ekstraoral radyografi yöntemlerine yönlendirmiştir. Panoramik radyografide büyük bir hacmin tek bir düzlemsel görüntüye yansıtılmasına bağlı olarak ortaya çıkan görüntü magnifikasyonu, distorsiyon gibi dezavantajlar, panoramik radyografinin periodontal hastalıkların tanılanmasındaki rolünü sınırlandırmasına rağmen (Corbet vd., 2009; Mol, 2004), konik ışınli bilgisayarlı tomografiye ve tüm ağız intraoral radyografilere kıyasla daha az radyasyon dozu ve daha kısa sürede görüntüleme imkanı sunması dolayısıyla en çok tercih edilen radyolojik görüntüleme yöntemi olmuştur.

Yapay zeka destekli çalışmalar da bu yönde şekillenmiş olup yapılan çalışmaların büyük çoğunluğunda panoramik röntgen üzerinden modeller geliştirilmiş ve kullanılmıştır. İncelenen çalışmalar, yapay zeka tabanlı modellerin periodontal kemik kaybının radyolojik tespitinde yüksek doğruluk oranları sunduğunu göstermektedir. Geleneksel yöntemlere kıyasla yapay zeka tabanlı modellerle elde edilen sonuçlar daha tutarlı ve tekrarlanabilir bulunmuştur. Bazı çalışmaların diş hekimleriyle karşılaştırılabilir hatta daha üstün sonuçlar verdiği görülmüştür (Kao vd., 2025; Kim vd., 2019). Bazı çalışmaların ise diş hekimleriyle benzer hatta daha düşük duyarlılık oranları gösterdiği görülmüştür (Krois vd., 2019).

Elde edilen yüksek performans metriklerine rağmen çalışmalarda sunulan performans metrikleri arasında heterojenlik görülmektedir ve bu durum çalışmaların kendi içinde kıyaslanmasını zorlaştırmaktadır.

Panoramik radyografi ile yapılan çalışmalarda, ağırlıklı olarak CNN(Convolutional Neural Network) yapay zeka modeli kullanıldığı görülmüş olup (Kao, Tseng, Tsai, & Huang, 2025; Krois vd., 2019)'nin çalışmalarında kullanılan CNN(Convolutional Neural Network) mimarisi açıkça belirtilmemiştir. Kalan panoramik radyografi çalışmalarında ise birbirinden farklı mimariler kullanılmıştır. Bu durumda yapılan çalışmalar birbiriyle anlamlı olarak kıyaslanamamıştır.

YOLOv8 ile yapılan panoramik radyografi çalışmalarında (Putra vd., 2025) 500 veri seti kullanırken, (Jundaeng, Chamchong, & Nithikathkul, 2025) 2000 veri seti kullanmıştır. Çalışmalar arasında farklı veri setleri kullanılması performans sonuçlarının doğrudan kıyaslanmasını güçleştirmektedir.

Periapikal radyografi teknikleri ile yapılan 4 çalışmada, farklı yapay zeka modelleri kullanılmış olması karşılaştırılabilirliği sınırlandırmıştır. Literatürde bu görüntüleme yöntemiyle yapılan toplam çalışmanın sayıca azlığı genelleme yapılmasını zorlaştıran bir diğer faktördür.

Bitewing radyografi çalışması 2 olup sayı bakımından yetersiz ve farklı yapay zeka modelleri kullanılarak hazırlanmıştır. Ayrıca çalışma sonuçlarında hesaplanan performans metriklerinin birbirinden farklı olması karşılaştırılabilirliği zorlaştırmıştır. (AlGhaihab vd., 2025) doğruluk, duyarlılık ve özgüllük değerlerini hesaplarken (Cassiano vd., 2025) duyarlılık, kesinlik ve F1 skorunu hesaplamıştır.

Konik ışınli bilgisayarlı tomografi ile yapılan çalışma sayısı yalnızca 1 olup doğruluk ve tutarlılık açısından karşılaştırma yapılabilecek başka bir çalışma bulunmamaktadır.

Sonuç olarak, genel çalışma sonuçlarından elde edilen yüksek performans metrikleri; yapay zekanın periodontal kemik kaybının radyolojik olarak tespitinde yardımcı bir araç olarak kullanımının gelecek vadettiğini göstermektedir. Fakat çalışmaların farklı yapay zeka modelleri ve veri setleri kullanılarak yapılmış olması başlıca kısıtlılıklar arasında yer almaktadır. Bununla birlikte yapay zeka; diş hekimi ve hasta açısından tanı doğruluğunu artırmak, tanıya uzanan zamanı azaltmak gibi faydalarının yanı sıra etik sorunlar, teknik aksaklıklar, teknik kurulum, yazılım güncellemesi gereksinimi, ek ekipman gibi dezavantajları da taşımaktadır.

KAYNAKÇA

- AlGhaihab, A., Moretti, A. J., Reside, J., Tuzova, L., Huang, Y.-S., & Tyndall, D. A. (2025). Automatic Detection of Radiographic Alveolar Bone Loss in Bitewing and Periapical Intraoral Radiographs Using Deep Learning Technology: A Preliminary Evaluation. *Diagnostics*, 15(5), 576. <https://doi.org/10.3390/diagnostics15050576>
- Amasya, H., Jaju, P. P., Ezhov, M., Gusarev, M., Atakan, C., Sanders, A., ... Orhan, K. (2024). Development and validation of an artificial intelligence software for periodontal bone loss in panoramic imaging. *International Journal of Imaging Systems and Technology*, 34(1), e22973. <https://doi.org/10.1002/ima.22973>
- Cassiano, L. de B. A., da Silva, J. P. C., Martins, A. A., Barbosa, M. T., Rodrigues, K. T., Barbosa, Á. R. L., ... de Aquino Martins, A. R. L. (2025). Evaluation of an artificial intelligence-based model in diagnosing periodontal radiographic bone loss. *Clinical Oral Investigations*, 29(4), 195. <https://doi.org/10.1007/s00784-025-06283-8>
- Chen, C.-C., Wu, Y.-F., Aung, L. M., Lin, J. C.-Y., Ngo, S. T., Su, J.-N., ... Chang, W.-J. (2023). Automatic recognition of teeth and periodontal bone loss measurement in digital radiographs using deep-learning artificial intelligence. *Journal of Dental Sciences*, 18(3), 1301-1309. <https://doi.org/10.1016/j.jds.2023.03.020>
- Corbet, E. F., Ho, D. K. L., & Lai, S. M. L. (2009). Radiographs in periodontal disease diagnosis and management. *Australian Dental Journal*, 54 Suppl 1, S27-43. <https://doi.org/10.1111/j.1834-7819.2009.01141.x>

- Dujic, H., Meyer, O., Hoss, P., Wölfle, U. C., Wülk, A., Meusburger, T., ... Kühnisch, J. (2023). Automatized Detection of Periodontal Bone Loss on Periapical Radiographs by Vision Transformer Networks. *Diagnostics*, 13(23), 3562. <https://doi.org/10.3390/diagnostics13233562>
- Hoss, P., Meyer, O., Wölfle, U. C., Wülk, A., Meusburger, T., Meier, L., ... Dujic, H. (2023). Detection of Periodontal Bone Loss on Periapical Radiographs-A Diagnostic Study Using Different Convolutional Neural Networks. *Journal of Clinical Medicine*, 12(22), 7189. <https://doi.org/10.3390/jcm12227189>
- Jiang, L., Chen, D., Cao, Z., Wu, F., Zhu, H., & Zhu, F. (2022). A two-stage deep learning architecture for radiographic staging of periodontal bone loss. *BMC Oral Health*, 22(1), 106. <https://doi.org/10.1186/s12903-022-02119-z>
- Jundaeng, J., Chamchong, R., & Nithikathkul, C. (2025). Advanced AI-assisted panoramic radiograph analysis for periodontal prognostication and alveolar bone loss detection. *Frontiers in Dental Medicine*, 5. <https://doi.org/10.3389/fdmed.2024.1509361>
- Kao, C.-T., Tseng, C.-J., Tsai, M.-C., & Huang, C.-N. (2025). Determination of periodontal bone loss in panoramic radiographs through artificial intelligence analysis. *Journal of Dental Sciences*, 20(1), 698-700. <https://doi.org/10.1016/j.jds.2024.09.031>
- Kim, J., Lee, H.-S., Song, I.-S., & Jung, K.-H. (2019). DeNTNet: Deep Neural Transfer Network for the detection of periodontal bone loss using panoramic dental radiographs. *Scientific Reports*, 9(1), 17615. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-53758-2>
- Krois, J., Ekert, T., Meinhold, L., Golla, T., Kharbot, B., Wittemeier, A., ... Schwendicke, F. (2019). Deep Learning for the Radiographic Detection of Periodontal Bone Loss. *Scientific Reports*, 9(1), 8495. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-44839-3>
- Kurt, S., Çelik, Ö., Bayrakdar, İ. Ş., Orhan, K., Bilgir, E., Odabas, A., & Aslan, A. F. (2020). SUCCESS OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE SYSTEM IN DETERMINING ALVEOLAR BONE LOSS FROM DENTAL PANORAMIC RADIOGRAPHY IMAGES. *Cumhuriyet Dental Journal*, 23(4), 318-324. <https://doi.org/10.7126/cumudj.777057>
- Kurt-Bayrakdar, S., Bayrakdar, İ. Ş., Kuran, A., Çelik, Ö., Orhan, K., & Jagtap, R. (2025). Advancing periodontal diagnosis: Harnessing advanced artificial intelligence for patterns of periodontal bone loss in cone-beam computed tomography. *Dentomaxillofacial Radiology*, 54(4), 268-278. <https://doi.org/10.1093/dmfr/twaf011>
- Kurt-Bayrakdar, S., Bayrakdar, İ. Ş., Yavuz, M. B., Sali, N., Çelik, Ö., Köse, O., ... Orhan, K. (2024). Detection of periodontal bone loss patterns and furcation defects from panoramic radiographs using deep learning algorithm: A retrospective study. *BMC Oral Health*, 24, 155. <https://doi.org/10.1186/s12903-024-03896-5>

- Le, M. H., Mai, X. H., Tumur-Ulzii, B., Kim, S.-H., & Oh, N.-S. (2026). Automated periodontitis diagnosis and staging using an end-to-end deep learning model on panoramic dental radiographs. *Oral Radiology*. <https://doi.org/10.1007/s11282-026-00921-x>
- Lee, C.-T., Zhang, K., Li, W., Tang, K., Ling, Y., Walji, M. F., & Jiang, X. (2024). Identifying predictors of the tooth loss phenotype in a large periodontitis patient cohort using a machine learning approach. *Journal of Dentistry*, 144, 104921. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2024.104921>
- Mol, A. (2004). Imaging methods in periodontology. *Periodontology 2000*, 34(1), 34-48. <https://doi.org/10.1046/j.0906-6713.2003.003423.x>
- Preshaw, P. M. (2015). Detection and diagnosis of periodontal conditions amenable to prevention. *BMC Oral Health*, 15 Suppl 1(Suppl 1), S5. <https://doi.org/10.1186/1472-6831-15-S1-S5>
- Putra, R. H., Astuti, E. R., Nurrachman, A. S., Savitri, Y., Vadya, A. V., Khairunisa, S. T., & Iikubo, M. (2026). Applicability and performance of convolutional neural networks for the identification of periodontal bone loss in periapical radiographs: A scoping review. *Oral Radiology*, 42(1), 1-12. <https://doi.org/10.1007/s11282-025-00839-w>
- Putra, R. H., Astuti, E. R., Wijaksana, I. K. E., Fariza, A., Sitalaksmi, R. M., & Yoda, N. (2025). Automated Periodontal Bone Loss Detection on Panoramic Radiographs Using You Only Look Once v8 (YOLOv8): A Retrospective AI Approach. *Journal of International Oral Health*, 17(3), 203. https://doi.org/10.4103/jioh.jioh_20_25
- Ragab, M. G., Abdulkadir, S. J., Qaid, N., Gondal, T. M., Alqushaibi, A., Qureshi, R., & Shaukat, F. (2025). Periodontitis bone loss detection in panoramic radiographs using modified YOLOv7. *PeerJ Computer Science*, 11, e3102. <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.3102>
- Tonetti, M. S., Jepsen, S., Jin, L., & Otomo-Corgel, J. (2017). Impact of the global burden of periodontal diseases on health, nutrition and wellbeing of mankind: A call for global action. *Journal of Clinical Periodontology*, 44(5), 456-462. <https://doi.org/10.1111/jcpe.12732>
- Uzun Saylan, B. C., Baydar, O., Yeşilova, E., Kurt Bayrakdar, S., Bilgir, E., Bayrakdar, İ. Ş., ... Orhan, K. (2023). Assessing the Effectiveness of Artificial Intelligence Models for Detecting Alveolar Bone Loss in Periodontal Disease: A Panoramic Radiograph Study. *Diagnostics*, 13(10), 1800. <https://doi.org/10.3390/diagnostics13101800>
- Yadalam, P. K., Pawar, A. R., Natarajan, P. M., & Ardila, C. M. (2025). A novel dual embedding few-shot learning approach for classifying bone loss using orthopantomogram radiographic notes. *Head & Face Medicine*, 21(1), 49. <https://doi.org/10.1186/s13005-025-00528-3>
- Yu, H., Ye, X., Hong, W., Shi, R., Ding, Y., & Liu, C. (2024). A cascading learning method with SegFormer for radiographic measurement of periodontal bone loss. *BMC Oral Health*, 24(1), 325. <https://doi.org/10.1186/s12903-024-04079-y>

