



tmmob
makina mühendisleri odası

OTOMOTİV KONGRE ve SERGİSİ



BİLDİRİ KİTABI

05 - 06 Aralık 2025
BAOB Yerleşkesi • Bursa

SUNUŞ

TMMOB Makina Mühendisleri Odası olarak, stratejik bir konumda bulunan otomotiv sektörünü, 1985 yılından bu yana düzenlediğimiz Otomotiv Sempozyumları ve Kongreleri aracılığıyla bilimsel, teknik ve sektörel açıdan kapsamlı bir biçimde ele almaktayız. Bu organizasyonlar, sektörün mevcut durumunun sistematik olarak değerlendirilmesi, politika ve stratejilerin tartışılması ile teknolojik gelişmelerin paylaşılması açısından ülkemizde alanının en köklü ve saygın platformlarından biri olma niteliğini taşımaktadır.

Otomotiv sektörü, Türkiye ekonomisinin lokomotif alanlarından biri olarak, geçmişten günümüze hem üretim kapasitesi hem de ihracat hacmi açısından önemli bir rol oynamaktadır. Ülkemizde mühendislik bilgi birikiminin gelişmesine katkı sağlayan bu sektör, başlangıçta montaj ağırlıklı bir yapıya sahipken, zaman içerisinde ihracat odaklı üretim modeli ve küresel değer zincirine entegrasyon ile dönüşüm geçirmiştir. Gümrük Birliği ve uluslararası entegrasyon süreçleri, Türk otomotiv sanayisinin üretim ve kalite standartlarını yükseltmiş, aynı zamanda Ar-Ge ve mühendislik yetkinliklerinin önemini artırmıştır. Bu dönüşüm, sektörde nitelikli iş gücü ihtiyacını ve yenilikçi teknolojilere adaptasyon zorunluluğunu da beraberinde getirmiştir.

2025 yılı Kongremizin ana teması, **“Elektrikli Araçlar, Hidrojenli Araçlar, Hibrit Araçlar ve Otonom Sürüş Teknolojileri ile Şarj İstasyonları”** olarak belirlenmiştir. Kongre kapsamında, otomotiv sektöründe yaşanan teknolojik dönüşümün mühendislik, üretim, altyapı ve planlama boyutları çok yönlü olarak değerlendirilmiş; geleceğe dönük öngörüler ve çözüm önerileri sunulmuştur. Elektrikli ve otonom araç teknolojilerinin yanı sıra enerji altyapısı, şarj istasyonları ve hibrit çözümlerin sektöre entegrasyonu gibi konular, Kongre bildiri kitabının temelini oluşturmaktadır.

Bu kitap, Kongremizin Bilim Kurulu tarafından titizlikle değerlendirilmiş ve sunulması uygun bulunmuş bildirilerden oluşmakta olup, hem akademik birikime hem de sektörel uygulamalara katkı sağlamayı hedeflemektedir. Bildiriler, otomotiv sektörünün güncel durumunu ve geleceğe yönelik potansiyel yönelimlerini kapsamlı biçimde yansıtarak, araştırmacılara, mühendislere ve politika yapıcılara rehberlik edecek niteliktedir.

Otomotiv Kongremize bugüne kadar olduğu gibi bu yıl da değerli katkılarını sunan Düzenleme Kurulu, Yürütme Kurulu ve Bilim Kurulu üyeleri ile destek veren kurum ve kuruluşlara teşekkürlerimizi sunar; Kongrenin ülkemiz mühendisliğine ve otomotiv sektörünün gelişimine anlamlı katkılar sağlamasını dileriz.

KONGRE DÜZENLEME KURULU

Yunus YENER / TMMOB Makina Mühendisleri Oda Merkezi

Arife KURTOĞLU / TMMOB Makina Mühendisleri Oda Merkezi

Deniz Alp YILMAZ / TMMOB Makina Mühendisleri Oda Merkezi

Ümit Galip UNCU / TMMOB Makina Mühendisleri Adana Şube

Yılmaz YILDIRIM / TMMOB Makina Mühendisleri Ankara Şube

İbrahim ATMACA / TMMOB Makina Mühendisleri Antalya Şube

Ahmet İhsan TAŞKINSEL / TMMOB Makina Mühendisleri Bursa Şube

Cemre DOĞAN İLHAN / TMMOB Makina Mühendisleri Denizli Şube

Sevim KARASALİH / TMMOB Makina Mühendisleri Edirne Şube

Özgür ÜNSAL / TMMOB Makina Mühendisleri Eskişehir Şube

Serkan BOSTANCIKLIOĞLU / TMMOB Makina Mühendisleri Gaziantep Şube

Mehmet Gürçan ERDİNÇ / TMMOB Makina Mühendisleri İstanbul Şube

Okan YASAN / TMMOB Makina Mühendisleri İstanbul Şube

Sıdık AKMAN / TMMOB Makina Mühendisleri İzmir Şube

Süleyman VAROL / TMMOB Makina Mühendisleri Kayseri Şube

Furkan GÜNDOĞAN / TMMOB Makina Mühendisleri Kocaeli Şube

Dolunay SARI / TMMOB Makina Mühendisleri Konya Şube

Tahsin Güven MERZECİ / TMMOB Makina Mühendisleri Mersin Şube

Ali DİNLER / TMMOB Makina Mühendisleri Samsun Şube

Gamze KOFOĞLU / TMMOB Makina Mühendisleri Trabzon Şube

Erhan ÇAYIR / TMMOB Makina Mühendisleri Trabzon Şube

KONGRE YÜRÜTME KURULU

Ayer YARKINER / KTMMO

Ahmet İhsan TAŞKINSEL / TMMOB Makina Mühendisleri Odası Bursa Şube

Murat KORKUT / / TMMOB Makina Mühendisleri Odası Bursa Şube

Rengin EREN / BTSO

Berke ERCAN / TAYSAD

Sevgi ÖZÇELİK / TAYSAD

Tuna ARINCI / OİB

Prof. Dr. Ali Rıza YILDIZ / B.U.Ü. Makina Mühendisliği

Prof. Dr. Gökhan SEVİLGİN / B.U.Ü. Otomotiv Mühendisliği

Prof. Dr. Yusuf Ali KARA / B.T.Ü. Makina Mühendisliği

KONGRE SEKRETERİ

Erdem KIRAĞASI

TMMOB Makina Mühendisleri Odası Bursa Şubesi

KONGRE BİLİM KURULU

Prof. Dr. Ali KAHRAMAN / Necmettin Erbakan Üniversitesi

Prof. Dr. Ali Rıza YILDIZ / Bursa Uludağ Üniversitesi

Prof. Dr. Aziz Armağan ARICI / Kocaeli Üniversitesi

Doç. Dr. Billur Deniz KARAHAN / İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Erkan ERDİL / Orta Doğu Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Gökhan SEVİLGİN / Bursa Uludağ Üniversitesi

Doç. Dr. Gamze GEDİZ İLİŞ / Gebze Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Hakan ERSOY / Akdeniz Üniversitesi

Prof. Dr. Hüsnü DAL / Orta Doğu Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. İlker SUGÖZÜ / Mersin Üniversitesi

Doç. Dr. Dinçer AKAL / Trakya Üniversitesi

Prof. Dr. Mesut TEKKALMAZ / Eskişehir Osmangazi Üniversitesi

Doç. Dr. Mehmet Murat TOPAÇ / Dokuz Eylül Üniversitesi

Doç. Dr. Mehmet Fatih KAYA / Erciyes Üniversitesi

Doç. Dr. Mert GÜLÜM / Karadeniz Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Orhan Behiç ALANKUŞ / Okan Üniversitesi

Prof. Dr. Özgül KELEŞ / İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Rezan DEMİR ÇAKAN / Gebze Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Semih BİLGİN / Okan Üniversitesi

Şinasi EKİNCİOĞLU / Ekin Sigorta Ekspertiz

Prof. Dr. Yusuf Ali KARA / Bursa Teknik Üniversitesi

1. GÜN
05 ARALIK 2025 CUMA

09:00 - 09:45 KAYIT

09:45 – 10:55 AÇILIŞ KONUŞMALARI

10:55 – 11:30 AVRUPA'NIN ELEKTRİKLİ ARAÇLARA DÖNÜŞÜMDEKİ KONUMU VE TÜRKİYE
Ümit BATMAZ

11:45 – 12:45 I. OTURUM OTOMOTİV SEKTÖRÜ VE MOBİLİTENİN GELECEĞİ

13:45 – 14:30 II. OTURUM TMMOB MMO TEKNİK, GÜVENLİK, DENETİM ÇALIŞMA GRUBU
SUNUMU

14:45 – 16:00 III. OTURUM TRAFİK GÜVENLİĞİ İÇİN ARAÇ MUAYENESİ / TEKNİK GÜVENLİK
DENETİMİ UYGULAMALARI VE FİLO MÜHENDİSLİĞİ

IV. OTURUM Bildiri Sunumları

- Erdem SÖYLER - Elektrikli Araçlara Yönelik Satın Alma Tercihlerinin Belirlenmesi: Türkiye İçin Ampirik Bir Araştırma
- Melis KAVAKLI - Türkiye'de Teknoloji Algısı, Toplumsal Segmentler ve Elektrikli Araç Satın Alma Eğilimi
- Salih YILDIRIM - Yeni Teknolojilerin Toplumsal Kabulü: Elektrikli Araçlara Yönelik Davranışsal Niyetin Analizi
- Ecem ÖZKAN - Elektrikli Araç Kullanıcılarına İlişkin Algısal Dinamikler: Marmara Bölgesi Örneği
- **16:15 – 17:30 V. OTURUM** Bildiri Sunumları
- Gürcan ÖZDEMİR - Otomotiv Sektörü Türkiye Pazarı Bir Durum Analizi Örneği
- Cenk Erim TEZEL - Yan Sanayide Gizli Tehdit: Bursa Otomotiv Ekosisteminde Bilgi Güvenliği Yolculuğu
- Ahmet Hamdi BAŞARAN - WAC: Aşınma Ayarlı Debriyaj Baskısı
- Cenk Erim TEZEL - Model Tabanlı Sistem Mühendisliği Yaklaşımıyla Otomotiv Güvenlik Standartlarının Entegrasyonu

VI. OTURUM (Paralel Oturum)

- İsmail DURGUN - Otomotiv Ar-Ge Mühendisi Yetkinlik Gelişim Programı
- Ali Rıza YILDIZ - Otomotiv Güvenlik Sistemleri için Ökzetik Yapılı Enerji Emicilerin Prototip Performans Değerlendirmesi
- Sevda Bora ÇINAR - Otonom Araçların Hukuki ve Etik Sorumluluğu: Etik Çevre Tasarımı Olmadan Adil Sürüş Mümkün mü?
- Yasemin YILMAZOĞLU¹, Prof. Dr. Ufuk SAKARYA² - Otonom Sürüş Sistemleri İçin Bir Öneri: Trafik İşaretlerinin Otomatizasyonu

2 . GÜN

06 ARALIK 2025 CUMARTESİ

09:45 – 11:00

VII. OTURUM Bildiri Sunumları

- Barış ÇAVUNT - Alüminyum Alçak Basınçlı Dökümde Hızlı Prototipleme Yöntemlerinin Karşılaştırılması
- Fahrettin AYDEMİR - Alsi7 Ve Alsi10 Alaşımlarında Yorulma Davranışının Deneysel Ve Sonlu Elemanlar Yöntemi İle İncelenmesi
- Ömercan YÜRÜMEZ - Hidrojen Rayında Bağlantı Braketi Optimizasyonu Çalışması
- 4. Eren BAHÇECİ - Hidrojen Enjektörü Distribütör Parçasında Basınç Kaybı Optimizasyonu Ve Üretim Proseslerinin Araştırılması

VIII. OTURUM (Paralel Oturum) Bildiri Sunumları

- Barış KÜSÜLÜ - Benzinli Enjektörlerde Basınç Yükleri ve Buna Bağlı Yorulma Ömür Hesaplamaları
- Hakan TÜRKMEN - Benzinli Enjektör Tüpünün Optimize Edilmiş Kompakt Tasarımı Projesi
- Mustafa Kerem ÖZDER - Yüksek Basınçlı Yakıt Rayında Vibrasyon Testi Sonucu Oluşan Kırık İçin Tasarım İyileştirme Aksiyonları
- İsmail DURGUN - Robot Kollu Eklemeli İmalat Yöntemi İle Büyük Ebatlı Parça Üretimi

11:15 – 12:30

IX. OTURUM (Paralel Oturum) Bildiri Sunumları

- Barış KÖMÜRCÜ - Elektrikli Araç Batarya Taşıyıcı Sistemlerinde Alüminyum Ekstrüzyon Teknolojisinin Tasarım, Üretim Ve Performans Açısından İncelenmesi
- Gizem ÇALIŞKAN - Elektrikli Bataryaların Üretim ve Kullanım Süreçlerinin Su ve Karbon Ayak İzi Açısından Değerlendirilmesi
- Sermin GÜNASLAN - ECE R100 V3'ün Çevresel Yansımaları Ve Türkiye'deki Uyum Durumu
- Celalettin YÜCE - Elektrikli Araçlar İçin Plastik Alt Koruyucu Kapak Tasarımı Ve Topoloji Optimizasyonu

X. OTURUM Bildiri Sunumları

- Arzu MİNARECİ - Benzinli Enjektör Sızdırmazlık Bölgesinde Meydana Gelen Parçalı Aşınmanın Sızdırmazlık İşlevini Bozması Üzerine Kök Neden Tespiti
- Aydan YALABAÇ - Benzinli Enjektörde Basınç Artışına Bağlı Kuvvet Değişimlerinin Statik Yakıt Debisi, Yakıt Tipi ve Sıcaklık Parametrelerine Göre İncelenmesi
- Mehmet Erman YILDIZ - PFAS Yasaklarının Benzinli Enjektör O-Ring Malzeme Seçimine Etkisi ve HNBR Alternatifinin Değerlendirilmesi
- Damla AKABALI - Krom Kaplı Parçaların Krom Tutunma Dayanımının Mekanik Test İle Değerlendirilmesi ve Tutunma Dayanımının İyileştirilmesi

13 : 30 – 14:30

XI. OTURUM ELEKTRİFİKASYON VE MÜHENDİSLİKTE DÖNÜŞÜM: YENİ NESİL YETKİNLİKLER

XII. OTURUM (Paralel Oturum) Bildiri Sunumları

- Rabia Şevval AKAN - Ağır Vasıta Araçlar İçin Pedal Tasarımı Ve Analizi
- Mert ILGIN - Macpherson Süspansiyon Sistemine Ait Salıncağın Termo-Mekanik Deformasyon Davranışının Sonlu Elemanlar Ve Deneysel İncelenmesi
- Osman Kaan AYDIN - Jant İşleminde Verimliliği Arttıran Yeni Nesil Bağlama Fikstürü
- Demeter Zeynep IRMAK - Çevresel Ve Kurumsal Sürdürülebilirlik Açısından Otomotiv Sektöründe Karşılaştırmalı Uygulamalar

14:45 - 15:00 KAPANIŞ KONUŞMASI

BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ DR. ARİF AĞAOĞLU İLERİ TEKNOLOJİLER MERKEZ LABORATUVARI ELEKTRİKLİ TAŞITLAR İÇİN BATARYA TEKNOLOJİLERİ ARAŞTIRMA VE GELİŞTİRME PLATFORMU (BATEG) ZİYARETİ

BİLDİRİ DİZİNİ

1. Elektrikli Araçlara Yönelik Satın Alma Tercihlerinin Belirlenmesi: Türkiye İçin Ampirik Bir Araştırma
2. Türkiye’de Teknoloji Algısı, Toplumsal Segmentler ve Elektrikli Araç Satın Alma Eğilimi.
3. Yeni Teknolojilerin Toplumsal Kabulü: Elektrikli Araçlara Yönelik Davranışsal Niyetin Analizi
4. Elektrikli Araç Kullanıcılarına İlişkin Algısal Dinamikler: Marmara Bölgesi Örneği
5. Otomotiv Sektörü Türkiye Pazarı Bir Durum Analizi Örneği
6. Yan Sanayide Gizli Tehdit: Bursa Otomotiv Ekosisteminde Bilgi Güvenliği Yolculuğu.
7. WAC: Aşınma Ayarlı Debriyaj Baskısı
8. Model Tabanlı Sistem Mühendisliği Yaklaşımıyla Otomotiv Güvenlik Standartlarının Entegrasyonu
9. Otomotiv Güvenlik Sistemleri için Ökzetik Yapılı Enerji Emicilerin Prototip Performans Değerlendirmesi
10. Otomotiv Ar-Ge Mühendisi Yetkinlik Gelişim Programı
11. Otonom Araçların Hukuki ve Etik Sorumluluğu: Etik Çevre Tasarımı Olmadan Adil Sürüş Mümkün mü?
12. Otonom Sürüş Sistemleri İçin Bir Öneri: Trafik İşaretlerinin Otomatizasyonu
13. Alüminyum Alçak Basıncılı Dökümde Hızlı Prototipleme Yöntemlerinin Karşılaştırılması
14. Alsı7 Ve Alsı10 Alaşımlarında Yorulma Davranışının Deneysel Ve Sonlu Elemanlar Yöntemi İle İncelenmesi
15. Hidrojen Rayında Bağlantı Braketi Optimizasyonu Çalışması
16. Hidrojen Enjektörü Distribütör Parçasında Basınç Kaybı Optimizasyonu Ve Üretim Proseslerinin Araştırılması
17. Benzinli Enjektörlerde Basınç Yükleri ve Buna Bağlı Yorulma Ömür Hesaplamaları
18. Benzinli Enjektör Tüpünün Optimize Edilmiş Kompakt Tasarımı Projesi
19. Yüksek Basıncılı Yakıt Rayında Vibrasyon Testi Sonucu Oluşan Kırık İçin Tasarım İyileştirme Aksiyonları
20. Robot Kollu Eklemeli İmalat Yöntemi İle Büyük Ebatlı Parça Üretimi
21. Elektrikli Araç Batarya Taşıyıcı Sistemlerinde Alüminyum Ekstrüzyon Teknolojisinin Tasarım, Üretim Ve Performans Açısından İncelenmesi.
22. Elektrikli Bataryaların Üretim ve Kullanım Süreçlerinin Su ve Karbon Ayak İzi Açısından Değerlendirilmesi
23. ECE R100 V3’ün Çevresel Yansımaları Ve Türkiye’deki Uyum Durumu..
24. Elektrikli Araçlar İçin Plastik Alt Koruyucu Kapak Tasarımı Ve Topoloji Optimizasyonu
25. Benzinli Enjektör Sızdırmazlık Bölgesinde Meydana Gelen Parçalı Aşınmanın Sızdırmazlık İşlevini Bozması Üzerine Kök Neden Tespiti
26. Benzinli Enjektörde Basınç Artışına Bağlı Kuvvet Değişimlerinin Statik Yakıt Debisi, Yakıt Tipi ve Sıcaklık Parametrelerine Göre İncelenmesi
27. PFAS Yasaklarının Benzinli Enjektör O-Ring Malzeme Seçimine Etkisi ve HNBR Alternatifinin Değerlendirilmesi
28. Krom Kaplı Parçaların Krom Tutunma Dayanımının Mekanik Test İle Değerlendirilmesi ve Tutunma Dayanımının İyileştirilmesi.
29. Ağır Vasıta Araçlar İçin Pedal Tasarımı Ve Analizi
30. Macpherson Süspansiyon Sistemine Ait Salıncağın Termo-Mekanik Deformasyon Davranışının Sonlu Elemanlar Ve Deneysel İncelenmesi
31. Jant İşlemesinde Verimliliği Arttıran Yeni Nesil Bağlama Fikstürü
32. Çevresel Ve Kurumsal Sürdürülebilirlik Açısından Otomotiv Sektöründe Karşılaştırmalı Uygulamalar

ELEKTRİKLİ ARAÇLARA YÖNELİK SATIN ALMA İSTEĞİNİN BELİRLENMESİ: TÜRKİYE İÇİN AMPİRİK BİR ARAŞTIRMA

Erdem Söyler¹

¹Bursa Uludağ Üniversitesi, Görükle Mahallesi, Üniversite-1 Caddesi, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, No:

C, Daire: BATEG Laboratuvarı TÜRKİYE

Tel: 224 294 10 98 E-Posta: erdemsoyler@uludag.edu.tr

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5627-6696>

Özet – Küresel ölçekte ulaşımda kullanılan elektrikli araçların insan hayatında kullanımı giderek artmaktadır. Çalışma, Türkiye kamuoyunun elektrikli araçları satın alma isteğini ele almaktadır. Bu bağlamda yarı yapılandırılmış bir anket formu kullanılmış, Türkiye İstatistiki Bölge Birimleri Sınıflandırması-I'e göre uygulanmış ve tüm Türkiye'yi temsil etme özelliğine sahip 1092 yanıt alınmıştır. Kişilerin elektrikli araçları satın alma isteğinin sosyodemografik ve sosyoekonomik özelliklerine göre Mann-Whitney U ve Kruskal-Wallis H testleri kullanılarak; sembolik özellikler ve fonksiyonel özellikler faktörleri sıralı lojistik regresyon yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. Ulaşılan sonuçlar, gruplar arasındaki farklar cinsiyet, medeni hal, yaş, eğitim ve mesleğe göre değişmemekte; ikamet bölgesi ve gelire göre değişmektedir. Sıralı logit modellerin analiz sonuçlarına göre sembolik özellikler faktörü ve fonksiyonel özellikler faktörü pozitif yönde ve anlamlı bulunmuştur. Ayrıca elektrikli araçları satın alma isteğinde sembolik özellikler fonksiyonel özelliklerden daha güçlü bulunmuştur. Ayrıca, gelir arttıkça isteğin arttığı fakat gelirin belirli bir seviyeden sonra isteği azalttığı gözlenmiştir. Bu çalışma önemli içgörüler sağlamaktadır.

Anahtar sözcükler: Elektrikli araçlar; Satın alma isteği; Türkiye kamuoyu; Sembolik özellikler; Fonksiyonel özellikler

1. GİRİŞ

Son yıllarda dünyada ve Türkiye'de elektrikli araç satışlarında ciddi bir ivmelenme yaşanmaktadır. Türkiye otomobil pazarında da elektrikli araçların payı bu doğrultuda artmaktadır. Bu durumun yaşanmasının etkilerinden biri içten yanmalı motorlu araçların çevreye verdiği zararların kamuoyunu endişelendirecek düzeye çıkması ve bu bağlamda çevre konularına yaklaşımın giderek hassaslaşmasıdır. Bir diğer etken ise araç tercihlerinde içten yanmalı motorlu araçlar yerine daha teknoloji ile bütünleşmiş araçlara artan ilgidir. Günümüzde

nesnelerin interneti çağının başladığı söylenebilir. Türkiye ise bu dönüşümde yer almak istemiş ve 2023 yılında ilk yerli batarya elektrikli aracını üretmiştir. Ülke genelinde 2024 yılı sonuna kadar toplamda 176.689 adet batarya elektrikli araç satılmıştır. Ayrıca Ocak-Ekim 2025 tarihlerinde 219.789 hibrit, 148.304 adet elektrikli araç satılmıştır ve bunların pazar payı %44,2 olmuş; Ekim 2025'te satılan yaklaşık her 10 araçtan 4'ü ya hibrit ya da elektrikli olmuştur. Elektrikli araç satışları dikkate alındığında Türkiye'nin bu pazarda yeni ve gelişime açık bir yapı sergilediği söylenebilir.

Yaşanan tüm bu gelişmeler üzerine Türkiye kamuoyunun elektrikli araçlara yönelik tercihleri önem kazanmıştır. Bu çalışma ülkede yaşayan vatandaşların elektrikli araçlara yönelik satın alma isteğini konu almaktadır. Daha önceki çalışmalar, ülkeler itibarıyla kişilerin demografik özellikleri bakımından elektrikli araçları satın alma niyetlerinin farklılık gösterdiğini ortaya koymaktadır. Yakın zamanda bu konu ile ilgili pek çok araştırma mevcuttur. Fakat Türkiye için literatür araştırıldığında kapsamlı bir çalışmanın varlığına ulaşılamamıştır. Bu nedenle bu çalışmayı ön plana çıkaran en önemli özellik Türkiye'yi konu alıyor olması ve tüm ülkeyi temsil etmesidir.

Elektrikli araçlar için çalışma konuları, çevre, iklim değişikliği, tüketici tercihleri, altyapı koşulları, teknolojik faktörler, hükümet politikaları ve psikolojik teorilere dayanarak algılar, tutumlar, niyetler, davranışlar ve bunun gibi bir dizi faktörü ele alıp insan davranışlarını açıklamaya çalışan araştırmalardır. Diğer araştırma konuları arasında, teknolojik determinizm; elektrikli araç kullanıcıları ve satın alma potansiyeline sahip kişiler için yapılan lokal çalışmalar bulunmaktadır. Ancak bir ülkede hem elektrikli araç kullanıcılarının hem de satın alma potansiyeli olan veya olmayan kişilerin bir arada incelendiği, genel kamuoyunun değerlendirilmesinin yapıldığı çalışmalar son derece sınırlıdır. Her ne kadar elektrikli araçlar konusunda farklı araştırma alanları üzerine yoğunlaşma olsa da Türkiye bağlamının pekişmesi bu noktada önemli olmaktadır.

2. SORU VE ÖLÇEKLER

Yapılan literatür taraması neticesinde kabul görmüş çalışmalardan elde edilen ölçekler kullanılarak bir soru formu hazırlanmıştır. Ölçekler Türkçe'ye çevrilmiş ve Türkiye'ye uyarlanmıştır. Bu çalışma için Bursa Uludağ Üniversitesi Sosyal ve Beşeri Bilimler Araştırma ve Yayın Etik Kurulu'ndan 25.10.2024 tarihinde ve 2024-10 oturum sayısında etik kurul onayı alınmıştır. Anket beş bölümden oluşmaktadır. İlk bölümde demografik sorular, algı, tutum,

niyet sorularından, ikinci bölüm elektrikli araçların sembolik özellikleri ölçeğinden, üçüncü bölüm elektrikli araçların fonksiyonel özellikleri ölçeğinden, dördüncü bölüm elektrikli araçlara yönelik çevreci ideoloji ölçeğinden ve beşinci bölüm elektrikli araçlara yönelik tekno-iyimserlik ölçeğinden meydana gelmektedir. Anketi yanıtlamak 5-10 dakika arasında sürmektedir. Elektrikli araçları satın alma isteğine ilişkin soru, elektrikli araçların sembolik özellikleri ölçeği ve elektrikli araçların fonksiyonel özellikleri ölçeği Tablo 1'de sunulmaktadır.

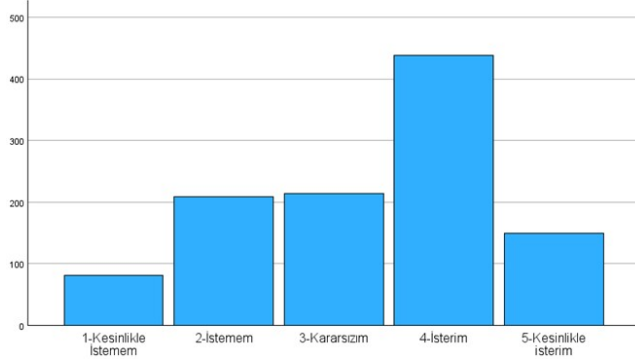
Tablo 1. Ölçekler ve Soru Tanımları

Soru no	Ölçeğe ait soru tanımları
Satın alma isteği	
Soru 1.1	Eğer şu an yeni bir araç alma şansım olsa, bunun elektrikli bir araç olmasını isterim.
Sembolik özellikler ölçeği (Cronbach's Alpha: 0,849)	
Soru 2.1	Petrole olan bağımlılığımızı azaltacaktır.
Soru 2.2	Daha az bakım maliyetine sahip olacaktır.
Soru 2.3	Çevre kirliliğini giderecektir (Sera gazı salınımını azaltacaktır).
Soru 2.4	Görünümleri daha cezbedicidir.
Soru 2.5	Daha konforludurlar.
Soru 2.6	Daha güvenlidirler.
Soru 2.7	Ülke ekonomisine daha fazla katkı sağlar.
Soru 2.8	Sürdürülebilirlikleri daha yüksektir.
Fonksiyonel özellikler ölçeği (Cronbach's Alpha: 0,817)	
Soru 3.1	Fiyatları çok yüksek.
Soru 3.2	Menzil sorunları var (Dolu bir bataryayı kısa bir mesafe sonra yeniden şarj etmek gerekiyor).
Soru 3.3	Emniyet sorunları var.
Soru 3.4	Şarj istasyonu sayısı az.
Soru 3.5	Şarj etme süresi çok uzun.
Soru 3.6	Şarj etme maliyetleri yüksek.
Soru 3.7	Bataryanın (8-10 yıl sonra) yüksek maliyet ile değiştirilmesi gerekiyor.
Soru 3.8	İkinci el piyasası yok.
Soru 3.9	Kişisel veri güvenliği sorunları var.
Soru 3.10	Bakım ve onarım sorunları var.

Not(lar): Ölçeklerde tersine soru kullanılmamıştır. (Kaynak: Yazar, Egbue ve Long (2012)'den yararlanarak türetmiştir.)

Elektrikli araçları tercih etmede kullanılan satın alma isteğine ilişkin soruya alınan yanıtların bar grafiği Şekil 1'de sunulmaktadır.

Şekil 1. Elektrikli Araçları Satın Alma İstemi Sorusuna Verilen Cevapların Dağılımı



Soru 1.1'e alınan yanıtların dağılımları sırasıyla 1: %7,4; 2: %19,1; 3: %19,6; 4: %40,1 ve 5: %13,7'dir.

3. VERİ VE TAHMİNLER

Veriler, tüm Türkiye'yi temsil eden, Türkiye İstatistiki Bölge Birimleri Sınıflandırması-I'e (12 bölge) göre, yetkin bir anket firması aracılığı ile toplanmıştır. Veri toplama süreci 26 Mayıs 2025 – 04 Kasım 2025 tarihleri arasında gerçekleşmiştir. Verilerin hazırlanması anket firması tarafından yapılmıştır. Uygulamaya hazır toplamda 1092 adet veri elde edilmiştir. Çalışmanın metodolojik olma özelliği bulunmaktadır. Bu kapsamda soru yapıları ve sorulardan alınan yanıtların hangi veri türünden meydana geldiğine dikkat edilmiştir. Ankette 5'li Likert tipi ölçeğe göre puan usulüne dayanarak yanıtlar alınmış, bağımlı değişken sıralı kategorik yapıda oluşmuştur. Öncelikle tanımlayıcı istatistikler incelenmektedir. Daha sonra Türkiye kamuoyunun sosyodemografik ve sosyoekonomik özellikleri dikkate alınarak elektrikli araçları satın alma isteğinin gruplar itibarıyla değişip değişmediği Mann-Whitney U testi ve Kruskal-Wallis H testi ile incelenmektedir. Testlere ilişkin sonuçlar Tablo 2'de sunulmaktadır.

Tablo 2. Türkiye Kamuoyunun Gruplar İtibarıyla Elektrikli Araç İsteği

Gruplar	n	Yüzdelik	Ortalama sıralama	Marjinal anlamlılık
<u>Cinsiyet</u>				
Kadın	547	%50,1	545,17	P = 0,884 ^U
Erkek	545	%49,9	547,83	
<u>Medeni hal</u>				
Evli	862	%78,9	539,12	P = 0,118 ^U
Bekâr	230	%21,1	574,18	
<u>Yaş</u>				
18-24	99	%9,1	528,68	P = 0,259 ^H
25-34	294	%26,9	581,22	
35-44	410	%37,5	543,49	
45-54	215	%19,7	519,54	
55-64	65	%6,0	533,78	
65 ve üstü	9	%0,8	481,06	
<u>İkamet bölgesi</u>				
Ankara	156	%14,3	496,56	P = 0,001 ^{H*}
Antalya	68	%6,2	518,35	
Bursa	85	%7,8	506,82	
Erzurum	22	%2,0	487,57	
Gaziantep	58	%5,3	587,51	
İstanbul	424	%38,8	509,88	
İzmir	122	%11,2	645,95	
Kayseri	40	%3,7	610,04	
Malatya	24	%2,2	678,31	
Samsun	40	%3,7	671,08	
Tekirdağ	30	%2,7	618,43	
Trabzon	23	%2,1	657,09	
<u>Eğitim durumu</u>				
İlkokul	40	%3,7	524,95	P = 0,664 ^H
Ortaokul	76	%7,0	531,17	
Lise	424	%38,8	547,49	
Ön lisans	127	%11,6	575,40	
Lisans	332	%30,4	547,18	
Yüksek lisans	63	%5,8	491,99	
Doktora	30	%2,7	584,68	
<u>Meslek</u>				
İşçi	167	%15,3	548,93	P = 0,437 ^H
Esnaf / Sanatkâr / Tacir	196	%17,9	561,94	
İşsiz	46	%4,2	559,21	
Memur	133	%12,2	588,88	
Emekli	62	%5,7	485,86	
Öğrenci	22	%2,0	459,45	
Ev hanımı	78	%7,1	504,09	
Çiftçi	6	%0,5	566,25	
Nitelikli serbest meslek	119	%10,9	533,27	
Özel sektörde masabaşı	183	%16,8	544,90	
Özel sektörde yönetici	74	%6,8	517,04	
<u>Hanenin aylık toplam geliri</u>				
Asgari ücretin altı	17	%1,6	395,03	P = 0,006 ^{H*}
Asgari ücret	43	%3,9	409,67	
22.105-40.000₺	144	%13,2	440,93	
40.001-60.000₺	230	%21,1	460,40	
60.001-80.000₺	180	%16,5	487,77	
80.001-100.000₺	103	%9,4	451,81	
100.001-150.000₺	83	%7,6	413,86	
150.000₺ üstü	87	%8,0	361,21	
Cevap yok†	205	%18,8		

Not(lar): †, analize dâhil olmayan kategori; U, Mann-Whitney test istatistiğini; H, Kruskal-Wallis test istatistiğini ve *, p < 0,01 düzeyinde anlamlılığı ifade etmektedir. (Kaynak: Yazarın kendi çalışmalarıdır.)

Son olarak iki farklı logit model kurularak, satın alma isteği elektrikli araçların sembolik özellikleriyle ve satın alma isteği elektrikli araçların fonksiyonel özellikleriyle açıklanmaya çalışılmaktadır. Her iki özelliğe ait değişkenler yaratılırken ilgili ölçeğin sorularına verilen yanıtlardan elde edilen puanlarının ortalaması alınarak hesaplanmıştır. Bu sayede sürekli değişkenler elde edilmiştir. Modellerin daha dirençli olması için modellere kontrol değişkenleri de dâhil edilmiştir. Modeller sıralı lojistik regresyon yöntemiyle tahmin edilmektedir. Modeller matematiksel olarak sırasıyla:

$$\text{logit}[P(Y_i \leq j)] = \alpha_j - (\beta_1 X_{i,sa} + \beta_2 X_{i,inc} + \beta_3 X_{i,inc^2}) + \nu_i, \quad j = 1, 2, 3, 4 \quad (1)$$

$$\text{logit}[P(Y_i \leq j)] = \alpha_j - (\beta_1 X_{i,fa} + \beta_2 X_{i,inc} + \beta_3 X_{i,inc^2}) + \nu_i, \quad j = 1, 2, 3, 4 \quad (2)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada, Y_i : i 'inci kişinin satın alma isteğini; $X_{i,sa}$: i 'inci kişinin sembolik özelliklere verdiği puanı; $X_{i,fa}$: i 'inci kişinin fonksiyonel özelliklere verdiği puanı; $X_{i,inc}$: i 'inci kişinin aylık hanehalkı gelirini; X_{i,inc^2} : i 'inci kişinin aylık hanehalkı gelirinin karesini; α_j : $j = 1, 2, 3, 4$ olmak üzere kesme noktalarını; β_k : $k = 1, 2, 3$ olmak üzere eğim parametrelerini; ν_i : rassal hata terimini göstermektedir. Modellerle ilişkin tahmin sonuçları Tablo 4'te ve Tablo 5'te sunulmaktadır.

Tablo 3. Model 1'e Ait Sıralı Lojistik Regresyon Tahmini

Değişkenler	Katsayı (Standart hata)	Odds oranı (Standart hata)	Marjinal anlamlılık
$X_{i,sa}$	1,0637 (0,0982)	2,8969 (0,2846)	0,000**
$X_{i,inc}$	0,3713 (0,1761)	1,4496 (0,2553)	0,035*
X_{i,inc^2}	-0,0433 (0,0173)	0,9577 (0,0166)	0,013*
Kesme noktası 1	1,6825 (0,5071)		
Kesme noktası 2	3,2703 (0,5083)		
Kesme noktası 3	4,2765 (0,5169)		
Kesme noktası 4	6,4666 (0,5400)		
McFadden's Pseudo R ²	0,0547	LR Ki-kare(3)	141,77
Log Olabilirlik	-1226,0935	Marjinal anlamlılık	0,0000**

Not(lar): *, $p < 0,05$ ve **, $p < 0,01$ düzeyinde anlamlılığı göstermektedir. (Kaynak: Yazarın kendi çalışmalarıdır.)

Tablo 4. Model 2'ye Ait Sıralı Lojistik Regresyon Tahmini

Değişkenler	Katsayı (Standart hata)	Odds oranı (Standart hata)	Marjinal anlamlılık
$X_{i,fa}$	0,3273 (0,1077)	1,3873 (0,1495)	0,002*
$X_{i,inc}$	0,5620 (0,1759)	1,7542 (0,3086)	0,001*
X_{i,inc^2}	-0,0627 (0,0173)	0,9392 (0,0163)	0,000*
Kesme noktası 1	-0,3678 (0,5437)		
Kesme noktası 2	1,1011 (0,5371)		
Kesme noktası 3	2,0179 (0,5407)		
Kesme noktası 4	4,0508 (0,5546)		
McFadden's Pseudo R ²	0,0104	LR Ki-kare(3)	26,87
Log Olabilirlik	-1283,5421	Marjinal anlamlılık	0,0000*

Not(lar): *, $p < 0,01$ düzeyinde anlamlılığı göstermektedir. (Kaynak: Yazarın kendi çalışmalarıdır.)

4. BULGULAR VE SONUÇ

Bu kısımda tahminlerden elde edilen sonuçlar yorumlanmaktadır.

4.1. Gruplara İlişkin Bulgular

Ankete verilen cevapların tanımlayıcı istatistikleri incelendiğinde, yanıtların dağılımlarının Türkiye dağılımıyla paralellik gösterdiği görülmüştür. Satın alma isteği; cinsiyet için, erkekler kadınlardan daha fazla istemekte fakat iki grup arasındaki fark anlamlı olmamaktadır. Keza medeni durum için, bekâr kişiler evli kişilere göre daha fazla istemekte ama iki grup arasındaki fark anlamlı olmamaktadır. Yaş için en fazla 25-34 yaş grubu istemiştir, en düşük yaş grubu 65 yaş ve üstü olmuştur. Tüm yaş grupları bir arada dikkate alındığında gruplar arasında fark olmadığı tespit edilmiştir. İkamet bölgesi için en fazla Malatya ve Samsun bölgesi istemiş, en az Erzurum ve Ankara bölgesi istemiş ve gruplar arasında farklılık anlamlı bulunmuştur. Eğitim için en fazla doktora tamamlamış kişiler, en az yüksek lisansını tamamlamış kişiler istemiş fakat eğitim grupları arasındaki farklılık anlamlı bulunmamıştır. Meslek grupları itibarıyla en fazla memur ve çiftçi olanlar, en az emekli ve öğrenciler istemiş ama meslek grupları arasındaki farklılık anlamlı bulunmamıştır. Gelir için 60.000-80.000₺ hanehalkı gelirine sahip kişiler en fazla 150.000₺ üstü hanehalkı gelirine sahip kişiler en az istemiş ve hanehalkı gelir grupları arasındaki farklılık anlamlı bulunmuştur.

4.2. Modellere İlişkin Bulgular

Modellerin tahmin sonuçlarına göre, Türkiye kamuoyunun elektrikli araçları satın alma isteğinde hem sembolik özelliklerin hem de fonksiyonel özelliklerin pozitif yönlü olduğu tespit edilmiştir. Elektrikli araçlara yönelik istekte, araçların sembolik özellikleri araçların fonksiyonel özelliklerinden daha güçlü olduğu bulunmuştur. Ayrıca kişilerin hanehalkı geliri arttıkça elektrikli araç satın alma isteği artmakta fakat belirli bir artıştan sonra elektrikli araç satın alma isteği azalmaktadır. Politika önerisi olarak, sektörde çalışan firmalar ve politika yapımcılar potansiyel tüketicilerin tercih ve düşüncelerini dikkate alarak elde edilen bulgulardan hareketle çalışmalar yürütebilirler. Son olarak bu çalışma geliştirilerek daha derinlemesine araştırmalar yapılabilir. Daha farklı modeller kullanarak Türkiye için genişletilebilir veya farklı ülkeler için çalışılabilir. Bu çalışmada yatay kesit verileri kullanılmıştır. Zaman etkisi veya nedensellik konusunda çıkarım yapılamamaktadır. Uzunlamasına veri kullanılarak bu etkiler dikkate alınabilir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma hazırlanırken, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) 1004 - Mükemmeliyet Merkezi Destek Programı, 22AG001 kodlu projesi ve Bursa Uludağ Üniversitesi (BUÜ) Bilimsel Araştırma Projeleri - Genel Araştırma Projesi, SGA-2024-1513 kodlu projesi tarafından desteklenmiştir.

5. REFERANSLAR

- [1] Agresti, A. (2019). An introduction to categorical data analysis (D. J. Balding, N. A. C. Cressie, G. M. Fitzmaurice, G. H. Givens, H. Goldstein, G. Molenberghs, D. W. Scott, A. F. M. Smith, & R. S. Tsay (eds.); Third edition). John Wiley & Sons, Inc.
<https://lccn.loc.gov/2018026887>
- [2] Egbue, O., & Long, S. (2012). Barriers to widespread adoption of electric vehicles: An analysis of consumer attitudes and perceptions. *Energy policy*, 48, 717-729.
<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.06.009>
- [3] International Energy Agency, (2025). Global Electric Vehicle Outlook 2025,
<https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2025>
- [4] Javid, R. J., & Nejat, A. (2017). A comprehensive model of regional electric vehicle adoption and penetration. *Transport Policy*, 54, 30-42.
<https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2016.11.003>
- [5] Otomotiv Distribütörleri & Mobilite Derneği, (2025). 2025 Ekim otomobil ve hafif ticari araç pazar değerlendirme,
<https://www.odmd.org.tr/folders/2837/categorial1docs/5977/ODMD%20Bas%c4%b1n%20Bulteni%204%20Kas%c4%b1m%202025.pdf>

TÜRKİYE’DE TEKNOLOJİ ALGISI, TOPLUMSAL SEGMENTLER VE ELEKTRİKLİ ARAÇ SATIN ALMA EĞİLİMİ

Proje Asistanı Melis Kavaklı¹

¹Bursa Uludağ Üniversitesi, ¹Bursa Uludağ Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Ekonometri Bölümü,

Özlüce Görükle Kampüsü, İİBF, C Blok, BATEG Laboratuvarı

Tel: 0224 294 10 98 E-Posta: meliskavakli@uludag.edu.tr

ORCID: 0000-0003-2298-2458

Özet-Türkiye’de teknolojik dönüşüm ve sürdürülebilir mobilite hızla ilerlerken, toplumun teknolojiye yönelik algılarının ve bu algıların davranışsal sonuçlarının anlaşılması önem taşımaktadır. Bu çalışma, 1092 katılımcıdan elde edilen verilerle gerçekleştirilen faktör analizi, kümeleme analizine dayanarak Türkiye’de teknoloji algısının yapısını ve bu algıların elektrikli araç satın alma eğilimi üzerindeki etkisini incelemektedir. Bulgular, teknoloji algısının toplumda homojen dağılmadığını; aksine belirgin toplumsal segmentler oluşturduğunu göstermektedir. Faktör analizi sonucunda teknoloji algısının iki boyuttan oluştuğu belirlenmiştir: “*Pozitif Teknoloji Algısı / Tekno-İyimserlik*” ve “*Teknoloji Memnuniyeti / Bireysel Refah Boyutu*”. Bu iki faktör toplam varyansın %65,4’ünü açıklamaktadır. Faktör skorları üzerinden yapılan kümeleme analizi, toplumu üç teknoloji algısı segmentine ayırmıştır: Teknoloji Şüphecileri (%19,4), Ekonomik-Pragmatik Destekçiler (%27,4) ve Tekno-İyimserler (%53,2). ANOVA sonuçları elektrikli araç satın alma eğiliminin bu segmentler arasında anlamlı farklılık gösterdiğini ortaya koymuştur. Teknoloji Şüphecileri diğer iki gruba kıyasla daha düşük satın alma eğilimine sahiptir; Ekonomik-Pragmatik Destekçiler ile Tekno-İyimserler arasında ise anlamlı bir fark bulunmamıştır. Bu durum, teknolojiye olumlu algılar geliştiren bireylerin elektrikli araçlara yönelik daha yüksek bir kabul düzeyi sergilediğini göstermektedir. Sonuç olarak çalışma, elektrikli araç politikalarının toplumun teknoloji algısındaki farklılıklara göre şekillendirilmesi gerektiğini ve özellikle şüpheli grubun güven temelli stratejilere ihtiyaç duyduğunu ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Elektrikli Araçlar, Teknoloji Algısı, Kümeleme Analizi.

1.GİRİŞ

Dijitalleşme ve teknolojik yeniliklerin hızla yayıldığı günümüzde, bireylerin teknolojiye yönelik algılarının anlaşılması önemli bir gereklilik hâline gelmiştir. Teknolojiye ilişkin algılar bireylerin yeniliklere karşı

tutumlarını, psikolojik eğilimlerini ve karar verme süreçlerini de belirlemektedir. Bu nedenle teknoloji algısının yapısal özelliklerini anlamak, özellikle yeni teknolojilerin benimsenmesi bağlamında kritik bir araştırma alanı ortaya çıkarmaktadır.

Elektrikli araçlar son yıllarda hem dünya genelinde hem de Türkiye’de dikkat çeken bir yenilik alanıdır. Ancak elektrikli araçların yaygınlaşmasında teknik özelliklerin yanı sıra bireylerin teknolojiye yönelik genel eğilimlerinin de etkili olduğu bilinmektedir. Teknolojiye karşı olumlu bir algıya sahip bireyler yeniliklere daha hızlı adapte olurken, daha temkinli ya da şüpheli bireylerin bu tür teknolojilere karşı daha mesafeli durabildiği görülmektedir. Dolayısıyla teknoloji algısı ile elektrikli araç satın alma eğilimi arasındaki ilişkiyi anlamak önem taşımaktadır.

2. TEORİK ARKA PLAN

Teknolojiye ilişkin bireysel algıların incelenmesi, sosyal psikoloji, iletişim çalışmaları ve teknoloji benimseme araştırmaları içinde geniş bir yere sahiptir. İnsanların teknolojiyle etkileşim biçimleri yalnızca teknik özelliklere değil; algısal değerlendirmelere, tutumlara, risk algısına ve bilişsel çerçevelere bağlı olarak şekillenmektedir. Bu nedenle teknolojiye ilişkin algıların yapısının ve işleyişinin anlaşılması, bireysel ve toplumsal düzeyde yenilikçi ürünlerin benimsenme süreçlerinin açıklanması açısından temel bir kuramsal alan oluşturur.

Teknoloji algısının literatürde ilk sistematik çerçevelerinden biri Davis (1989) tarafından geliştirilen Teknoloji Kabul Modeli’dir (TAM). Bu model, bireylerin bir teknolojiyi benimseme niyetlerini iki temel algısal boyutla açıklar: “*algılanan fayda*” ve “*algılanan kullanım kolaylığı*”. Algılanan fayda, bireyin teknolojiyi verimliliğini artıran, yaşamını kolaylaştıran veya işlevsel avantaj sağlayan bir araç olarak görmesiyle ilgilidir. Algılanan kullanım kolaylığı ise bireyin ilgili teknolojiyi öğrenme, kullanma ve günlük yaşama entegre etme

sürecinde yaşadığı zorlukların düzeyini ifade eder. Bu iki boyut, teknolojiye yönelik tutumların temel belirleyicileri olarak kabul edilmiştir.

Teknoloji algısının duygusal ve psikolojik yönleri de literatürde önemli bir yer edinmiştir. Teknoloji iyimserliği, teknoloji kaygısı, teknoloji stresi ve teknoloji yabancılaşması gibi kavramlar, bireylerin teknolojiyle kurduğu ilişkiyi açıklamada kullanılmaktadır. Çeşitli araştırmalar, bireylerin teknolojiye ilişkin olumlu duygusal eğilimlerinin yenilikçi ürünlere daha hızlı uyum sağladığını; buna karşılık teknoloji kaygısı ve şüpheciliğinin yeniliklerin benimsenmesini yavaşlattığını göstermektedir. Bu nedenle teknoloji algısı yalnızca bilişsel değerlendirmelerden ibaret değildir; bireyin yaşam deneyimleri, psikolojik tutumları ve teknolojiyle geçmişte yaşadığı etkileşimler algısal yapıyı doğrudan etkilemektedir.

Teknolojinin benimsenmesini yalnızca ekonomik veya teknik faktörlerle açıklamanın yetersiz olduğunu; bireylerin teknolojiye ilişkin algılarının çok boyutlu, psikolojik ve sosyal dinamiklerle biçimlendiğini ortaya koymaktadır. Dolayısıyla bu çalışmada kullanılan faktör yapısı ve ardından yapılan kümeleme analizi, teknoloji algısının toplumsal düzeyde nasıl farklılaşabileceğini anlamaya yönelik teorik temele dayanmaktadır. Aynı zamanda teknoloji algısının davranışsal niyetler üzerindeki rolü, çalışmada incelenen elektrikli araç satın alma eğilimi bağlamında kuramsal bir açıklama zemini sunmaktadır.

3.YÖNTEM

Bu çalışma, Türkiye’de bireylerin teknoloji algısının yapısını ortaya çıkarmak ve bu algının elektrikli araç satın alma eğilimi üzerindeki etkisi incelenmek istenmektedir. Türkiye genelinde 1092 katılımcıdan toplanan veriler üzerinden teknoloji algısının faktör yapısı incelenmiş, bu algılar doğrultusunda bireylerin hangi tutum gruplarında toplandığı kümeleme analiziyle belirlenmiş ve kümelerin elektrikli araç satın alma eğilimi üzerindeki etkisi analiz edilmiştir. Faktör analizi ile teknolojiye ilişkin maddelerin hangi boyutlar altında toplandığı ortaya konulmuş; elde edilen faktör skorları kümeleme analizine dâhil edilerek toplumun teknoloji algısına göre nasıl ayrıştığı gösterilmiştir. Son aşamada bu kümelerin elektrikli araç satın alma niyetleri arasındaki fark ANOVA testi sınanmıştır.

3.1 VERİ VE ÖRNEKLEM

Araştırmanın verileri, Türkiye genelinde 1092 katılımcıdan elde edilmiştir. Veriler çevrim içi anket uygulaması aracılığıyla toplanmış olup örneklem geniş bir sosyo-demografik çeşitlilik sunmaktadır. Çalışmada kullanılan teknoloji algısı ölçeği, bireylerin teknolojiye yönelik genel tutumlarını değerlendiren altı maddeden oluşmaktadır. Maddeler 5’li Likert tipi bir ölçeğe düzenlenmiştir (1 = Kesinlikle katılmıyorum, 5 = Kesinlikle katılıyorum).

Elektrikli araç satın alma eğilimi, katılımcıların elektrikli araçlara yönelik niyetlerini ölçen tek maddelik bir değişkenle değerlendirilmiştir. Bu değişken de 5’li Likert tipi bir yapıdadır.

3.2 BULGULAR

Tablo 1 sonuçlarına göre teknoloji algısı ölçeğinin yapısını incelemek amacıyla keşfedici faktör analizi uygulanmıştır. Analize başlamadan önce verinin faktör analizine uygunluğunu değerlendirmek için Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) örneklem yeterlilik testi ve Bartlett küresellik testi yapılmıştır. KMO değerinin 0.718 olarak bulunması, örneklem faktör analizi için yeterli olduğunu göstermiştir. Bartlett testi sonucunun anlamlı çıkması, maddeler arasında yeterli korelasyon bulunduğunu ve veri setinin faktör analizine uygun olduğunu doğrulamaktadır.

Tablo 1. KMO ve Bartlett Testi

Kaiser-Meyer-Olkin	0.718
(Bartlett Test)	
Chi-Square	1692.994
df	15
sig	0.000

Tablo 2’de sonuçlara göre, 6 değişken 2 faktörde toplanmaktadır. İlk faktör toplam varyansın %40.80’, ikinci faktör ise %24.60’ını açıklamaktadır. Üç faktörün birlikte varyans açıklama yüzdesi %65.40’dır.

Tablo 2. Varyans Yüzdeleri

1	40.80
2	24.60

Tablo 3’de Faktör Analizi sonuçları yer almaktadır. Faktör analizi sonuçları teknolojiye yönelik tutumların iki temel boyutta toplandığını göstermektedir. Bu iki boyut, bireylerin teknolojiyi hem toplumsal düzeyde bir dönüşüm aracı olarak hem de bireysel yaşam deneyimlerini etkileyen bir unsur olarak değerlendirdiğine işaret etmektedir.

Birinci faktör olan *Pozitif Teknoloji Algısı / Teknoloji İyimserliği*, teknolojiye ilişkin makro düzeyde bir değerlendirmeyi ifade etmektedir. Bu boyutta yer alan maddeler, teknolojiyi ekonomik kalkınmanın bir bileşeni, toplumsal ilerlemenin öncüsü ve bireysel kapasiteyi artıran bir kaynak olarak konumlandırmaktadır. “Teknoloji ilerleme demektir”, “Teknoloji Türkiye ekonomisi için önemlidir” ve “Teknoloji kapasitemizi artırır” gibi ifadeler, bireylerin teknolojiyi modernleşmenin, yenilikçiliğin ve rekabet gücünün temel unsuru olarak gördüklerini göstermektedir. Bu faktördeki yüksek yük değerleri, katılımcıların çoğunun teknolojiye yönelik genel ve geniş kapsamlı bir iyimserlik taşıdığını ortaya koymaktadır. Aynı zamanda “Teknolojik gelişmeleri yakından takip ederim” ifadesinin bu faktör altında yer alması, teknoloji iyimserliğinin yalnızca bilişsel bir değerlendirme değil; aynı zamanda davranışsal bir ilgi ve merak ile de bağlantılı

olduğunu göstermektedir. Bu durum, teknolojiyi olumlu değerlendiren bireylerin aynı zamanda yenilikleri aktif biçimde izleme eğiliminde olduğunu ifade etmektedir.

İkinci faktör olan *Teknoloji Memnuniyeti / Bireysel Refah Boyutu* ise daha mikro düzeyde bir değerlendirmeyi temsil etmektedir. Bu faktör, teknolojinin bireyin günlük yaşamı, mutluluğu ve psikolojik refahı üzerindeki etkisine odaklanmaktadır. “Teknoloji hayatı karmaşıklarırır” ifadesinin faktörde yer alması, teknolojinin bireysel düzeyde yarattığı bilişsel yük, uyum zorluğu ve zaman zaman rahatsızlık hissinin bazı bireylerde önemli bir boyut olarak algılandığını göstermektedir. Buna karşılık “Teknolojik gelişme insanların yaşam tatminini artırır” ifadesi, teknolojinin yaşam kalitesi ve memnuniyet üzerindeki potansiyel pozitif etkilerine işaret etmektedir. Bu iki maddenin birlikte bir faktör altında toplanması, bireylerin teknolojiye yönelik duygusal ve psikolojik değerlendirmelerinin karmaşık bir yapıda olduğunu göstermektedir: teknoloji bir yandan refahı artıran bir kolaylaştırıcı olarak görülürken, diğer yandan günlük hayatı zorlaştırabilen, uyum gerektiren bir unsur olarak da algılanabilmektedir.

Bu iki faktörün birlikte değerlendirilmesi, teknoloji algısının çok boyutlu doğasını açıkça ortaya koymaktadır. *Teknoloji İyimserliği* daha çok toplumsal gelişim, ekonomik kalkınma ve modernleşme gibi geniş ölçekli beklentilere dayanırken; *Bireysel Refah Boyutu* bireyin teknoloji ile kurduğu doğrudan, günlük yaşam ilişkisini ve bu ilişkinin duygusal-psikolojik yansımalarını içermektedir. Bu durum teknolojiye yönelik tutumların hem rasyonel hem duygusal hem de deneyimsel bileşenlerden oluştuğunu göstermektedir.

Sonuç olarak faktör analizi, teknolojiye yönelik tutumun yalnızca tek bir eksenle açıklanamayacağını; bireylerin teknolojiye ilişkin değerlendirmelerinin hem toplumsal ilerleme algıları hem de bireysel yaşam pratikleri çerçevesinde yapılandığını ortaya koymaktadır. Bu iki boyutun ayrışması, teknoloji algısının toplumsal segmentlerde neden farklılık gösterdiğini ortaya koymaktadır.

Tablo 3. Faktör Analizi Sonuçları
TEKNOLOJİ ALGISI

Pozitif Teknoloji Algısı Teknoloji İyimserliği	S.23.5 (Teknoloji ilerleme demektir) S.23.6 (Teknolojinin gelişmesi Türkiye ekonomisi için önemlidir.) S.23.3 (Teknoloji kapasitemizi artırır) S.23.7 (Teknolojik gelişmeleri yakından takip ederim)
Teknoloji Memnuniyeti / Bireysel Refah Boyutu	S.23.1 (Teknoloji gelişimi hayatımızı karmaşık hale getirir ve zorlaştırır) S.23.2. Sürekli teknolojik gelişme insanların yaşam tatminini artırır.)

Tablo 4’de kümeleme dağılımları gösterilmektedir. Kümeleme analizi sonucunda ortaya çıkan üç kümenin dağılımı, Türkiye’de teknoloji algısının toplum genelinde homojen olmadığını, aksine farklı yoğunluklarda üç belirgin profil oluşturduğunu göstermektedir.

Birinci küme %19.4 ile en küçük grubu oluşturmaktadır. Bu küme toplumun yaklaşık beşte birini temsil etmektedir. Bu oran, daha düşük teknoloji destek düzeyine sahip bireylerin mevcut olduğunu ancak toplumda baskın bir grup oluşturmadığını göstermektedir. Bu küme “*Teknoloji Şüphelileri*” grubunu oluşturmaktadır.

İkinci Küme %27.4 oranına sahiptir. Bu grubun yaklaşık üçte birlik bir büyüklüğe sahip olması, toplumun önemli bir kısmının teknolojiye karşı *ne tamamen olumsuz ne tamamen olumlu* bir pozisyon aldığını göstermektedir. Bu küme “*Ekonomik-Pragmatik Destekçiler*” grubunu oluşturmaktadır. Teknolojiye ilişkin değerlendirmelerin bu grup için durumdan duruma değişebildiğini gösterir. Yani bu bireyler teknolojiye karşı tamamen kapalı değildir; ancak pozitif algı oluşturan koşullar gerçekleşmediği sürece güçlü bir iyimserlik sergilememektedirler.

Üçüncü Küme %53.2 oranına sahiptir. Üçüncü kümenin örneklemin yarısından fazlasını oluşturmaları, toplumda teknolojiye karşı genel olarak olumlu bir eğilim bulunduğuna işaret etmektedir. Bu küme “*Tekno İyimserler*” grubunu oluşturmaktadır. Bu kümenin yüksek oranı, teknolojiye dair olumlu beklentilerin, ilerleme ve kapasite artışı algılarının toplumda yaygın olduğunu göstermektedir.

Tablo 4. Küme Dağılımları

1	212	%19.4
2	299	%27.4
3	581	%53.2
<i>Toplam</i>	<i>1092</i>	<i>%100</i>

Tablo 5’de Kümeleme Analizi sonuçları yer almaktadır. Kümeleme sonuçlarına göre üç farklı teknoloji tutumu profili ortaya çıkmıştır. Birinci küme hem ekonomik hem de bireysel boyutta en düşük teknoloji desteğine sahip gruptur. Faktör ortalaması -1.61 ile güçlü negatif tutum sergilemekte olup, bu küme “Teknoloji Şüpheli” olarak tanımlanmıştır. Teknolojiye yönelik toplumsal dönüşüm, ekonomik gelişim ve refah vaatlerine en düşük güven duyan gruptur. Politika, teknoloji yatırımı veya dönüşüm stratejilerine karşı muhtemelen direnç gösterecektir. İletişim stratejilerinde risk algısını azaltma, somut fayda gösterme ve güven inşası önemlidir.

İkinci küme, rasyonel ve faydacı bir kitleyi temsil etmektedir. Teknolojiyi ekonomik büyüme, verimlilik ve üretkenlik açısından nispeten olumlu değerlendiren, fakat onu bireysel mutluluk veya yaşam tatmini kaynağı olarak görmeyen bir yapıya sahiptir. Bu nedenle 0.31 ile yapısal olarak pozitif, ancak -1.24 ile bireysel olarak negatif yöndedir. Bu profil “Ekonomik-Pragmatik Destekçiler” olarak adlandırılmıştır. Bu grup teknolojiyi bir amaç değil, maliyet-fayda dengesi üzerinden değerlendirilen bir araç olarak görmektedir.

Üçüncü küme hem yapısal hem bireysel boyutlarda en yüksek teknoloji iyimserliği taşıyan gruptur. Teknolojiyi ilerleme, kapasite artışı, refah ve yaşam tatmini ile doğrudan ilişkilendirmektedir. Hem ekonomik hem kişisel düzeyde teknolojiye güven duymaktadırlar. Teknolojiyi ilerleme, modernleşme ve yaşam kalitesiyle doğrudan ilişkilendiren, yeniliklere en açık ve politika uygulamalarına en hızlı uyum sağlayabilecek gruptur.

Kümeleme analizine baktığımızda teknolojiyi toplumsal bir fırsat olarak görenlerle ona mesafeli yaklaşanlar arasında belirgin ayrışma görüyoruz. Şüpheli hem ekonomik hem bireysel düzeyde düşük destek gösterirken, pragmatik destekçiler teknolojiyi ekonomik yararlar üzerinden anlamlandırıyor, ancak kişisel refahla ilişkilendirmiyor. En büyük grup olan tekno-iyimserler ise teknolojiye hem ekonomik gelişim hem yaşam tatmini perspektifinden yüksek destek veriyor. Bu dağılım, teknoloji politikalarının tek tip mesajla değil, farklı kümelerin algısına göre hedeflenmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Tablo 5. Kümeleme Analizi Sonuçları

	Faktör 1	Faktör 2	
1	-0.61	-0.01	Teknoloji kaygılı / şüpheli
2	0.31	-1.24	Ekonomik-Pragmatik Destekçiler
3	0.43	0.64	Teknoloji İyimser

Tablo 6’da ANOVA sonuçlarına göre, her iki faktör açısından da kümeler arasında istatistiksel olarak anlamlı farklılık bulunmaktadır. Bu sonuç, kümelerin rastlantısal değil; gerçekten farklı teknoloji algı düzeylerine sahip olduğunu doğrulamaktadır.

Türkiye’de teknolojiyi genel olarak olumlu değerlendiren güçlü bir çoğunluk bulunduğunu, ancak buna karşın dikkate değer bir kaygılı kesim ve teknolojiye uzak duran bir grup olduğunu göstermektedir. Bu farklı tutum yapıları, elektrikli araç satın alma niyetini ve teknolojiye yönelik politika kabulünü doğrudan etkilemektedir.

Tablo 6. ANOVA Testi Sonuçları

Değişken	F	p-değeri
Faktör 1	915.812	0.000
Faktör 2	951.326	0.000

Tablo 7’de kümelere göre elektrikli araç satın alma eğilimleri gösterilmektedir. Birinci kümede yer alan bireylerin elektrikli araç satın alma niyetleri diğer kümelerle kıyasla belirgin biçimde düşüktür. Teknolojiye genel olarak düşük güven duyan ve yeniliklere karşı daha temkinli olan bu grupta elektrikli araçlara yönelik isteğin zayıf olması beklenen bir bulgudur. Yüksek standart sapma ise bu kümede bireysel farklılıkların daha fazla olduğunu göstermektedir.

İkinci kümede yer alan bireylerin elektrikli araç satın alma eğilimi Teknoloji Şüpheli’ye kıyasla anlamlı biçimde daha yüksektir. Teknolojiye ekonomik fayda odaklı yaklaşan bu segment, elektrikli araçları maliyet, performans, uzun vadeli tasarruf gibi rasyonel kriterlerle değerlendirmekte; bu nedenle teknolojiye tamamen olumlu yaklaşmalar bile satın alma niyetleri görece yüksektir.

Üçüncü kümede yer alan bireylerin Teknolojiye hem makro hem mikro düzeyde olumlu yaklaşan bu küme, elektrikli araçları yenilik, modernlik ve teknolojiyle uyumlu yaşam tarzının bir parçası olarak görmektedir. Bu nedenle satın alma niyetleri en yüksek seviyededir. Ancak Ekonomik-Pragmatik Destekçiler ile ortalamaların çok yakın olması,

teknolojiye olumlu yaklaşan tüm gruplarda davranışsal niyetin belirgin şekilde yüksek olduğunu göstermektedir.

Tablo 7. Kümelere Göre EV Satın Alma Eğilimi

Küme	Küme Adı	n	Ort.	Std.S
1	Tekno-Şüpheli	212	2.93	1.21
2	Ekonomik-Pragmatik Destekçi	299	3.42	1.07
3	Tekno-iyimser	581	3.44	1.12
Toplam		1092	3.34	1.15

Tablo 8’de ANOVA Testi sonucu yer almaktadır. Levene testi sonucunun anlamlı olmaması, kümeler arasında varyansların homojen olduğunu göstermekte ve ANOVA testinin uygunluğunu doğrulamaktadır. ANOVA sonuçları ise kümeler arasında elektrikli araç satın alma niyeti bakımından istatistiksel olarak anlamlı fark olduğunu göstermektedir. Bu bulgu, teknoloji algısının davranışsal niyet üzerinde belirleyici etkisi olduğunu desteklemektedir.

Tablo 8. ANOVA Testi Sonucu

Levene	p-değeri	ANOVA	
		F-ist	p-değeri
0.934	0.393	16.901	0.000

Tablo 9’da Post Hoc sonuçları yer almaktadır. Post Hoc Testi sonuçlarına göre; Küme 1 ile Küme 2 arasında ortalama fark -0.496 olup bu fark istatistiksel açıdan anlamlıdır. Küme 1 ile Küme 3 arasında ortalama fark -0.510’dur ve istatistiksel açıdan anlamlıdır. Bu bulgular, teknoloji şüpheli bireylerin elektrikli araç satın alma eğiliminin diğer iki kümeye göre belirgin biçimde düşük olduğunu göstermektedir.

Buna karşılık Küme 2 ile Küme 3 arasında anlamlı bir fark bulunmamaktadır. Bu durum, teknolojiye olumlu veya rasyonel biçimde değerlendiren bireylerin satın alma niyetlerinin birbirine çok yakın olduğunu göstermektedir. Yani teknolojiye açık olan bireyler arasında satın alma niyeti yönünde bir ayrışma bulunmamaktadır.

Tablo 9. Post hoc Testi Sonuçları

Kümeler	Ortalama Fark	p-değeri
Küme 1 -2	-0.496	0.000
Küme 1-3	-0.510	0.000
Küme 2-3	-0.014	0.983

4. SONUÇ

Bu çalışma, Türkiye’de bireylerin teknoloji algısının yapısını ortaya koymakta ve bu algıların elektrikli araç (EA) satın alma eğilimi üzerindeki etkisini incelemektedir. Faktör analizi sonuçları, teknoloji algısının “Pozitif Teknoloji Algısı / Teknoloji İyimserliği” ve “Teknoloji

Memnuniyeti / Bireysel Refah Boyutu” olmak üzere iki boyuttan oluştuğunu göstermiştir. Bu iki boyutun birlikte toplam varyansın %65,4’ünü açıklaması, teknolojiye yönelik tutumların toplumda belirgin ve güçlü bir yapıya sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Faktör skorlarıyla gerçekleştirilen kümeleme analizi, Türkiye’de teknoloji algısının homojen olmadığını; aksine toplumun üç ana segmentten oluştuğunu göstermiştir: Teknoloji Şüpheli (%19,4), Ekonomik-Pragmatik Destekçiler (%27,4) ve Tekno-İyimserler (%53,2). Bu bulgu, teknolojik yeniliklerin toplumda aynı şekilde algılanmadığını ve teknolojiye yönelik değerlendirmelerin farklı psikolojik ve sosyo-ekonomik temeller üzerinde şekillendiğini göstermektedir.

Çalışmanın temel amacı olan elektrikli araç satın alma eğilimine yönelik analizlerde; Teknoloji Şüpheli grubunun diğer iki kümeye kıyasla anlamlı derecede daha düşük niyet sergilediği bulunmuştur. Tekno-İyimserler ile Ekonomik-Pragmatik Destekçiler arasında ise anlamlı bir fark olmaması, teknolojiye olumlu bakan veya teknolojiyi fayda-maliyet çerçevesinde rasyonel biçimde değerlendiren bireylerin elektrikli araçlara daha yakın olduklarını göstermektedir. Yani olumlu teknoloji algısı satın alma niyetini yükseltirken, olumsuz algı belirgin biçimde azaltmaktadır.

Bu sonuçlar, elektrikli araçların benimsenmesinde sadece teknik faktörlerin değil, toplumun teknolojiye yönelik genel psikolojik ve algısal tutumlarının da kritik belirleyiciler olduğunu ortaya koymaktadır. Elektrikli araçların yaygınlaşmasını hedefleyen politika yapıcılarının, özellikle “şüpheli” segmenti hedefleyen bilgi, güven artırıcı kampanyalar ve risk azaltıcı stratejiler geliştirmesi önem taşımaktadır. Diğer yandan teknolojiye açık ve olumlu yaklaşan segmentlerde satın alma niyeti zaten yüksek olduğundan, bu gruplara yönelik stratejilerin daha çok teşvikler, altyapı geliştirme ve kullanıcı deneyimini iyileştirme yönünde olması daha etkili olacaktır.

Sonuç olarak çalışma, teknoloji algısının yalnızca bireylerin teknolojiyi nasıl değerlendirdiğini değil, aynı zamanda yenilikçi ürünlere yönelik davranışsal niyetlerini de şekillendirdiğini göstermektedir. Türkiye’de elektrikli araç pazarının büyümesi ve teknolojik dönüşüm politikalarının etkinliği, farklı teknoloji algısı segmentlerinin doğru okunmasına ve bu segmentlere göre özelleştirilmiş stratejilerin geliştirilmesine bağlı görünmektedir. Bu yönüyle çalışma hem literatüre katkı sunmakta hem de politika tasarımı açısından önemli bir yol haritası oluşturmaktadır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, TÜBİTAK 1004 - Mükemmeliyet Merkezi Destek Programı, 22AG001 kodlu projesi ve Bursa Uludağ Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) tarafından desteklenen SGA-2024-1513 kodlu projesi tarafından desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı TÜBİTAK ve Bursa Uludağ Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyon Başkanlığına teşekkür ederim.

5. REFERANSLAR

Bayram, N. (2016). “*Sosyal bilimlerde SPSS ile veri analizi*” (5. baskı). Ezgi Kitabevi.

Davis, F. D. (1989). "Perceived usefulness, perceived ease of use, and user acceptance of information technology." MIS Quarterly, 319–340.

Gürsakal, S. (2019). “*Sosyal bilimlerde SPSS uygulamalı çok değişkenli istatistiksel analiz teknikleri*.” Dora Yayıncılık.

YENİ TEKNOLOJİLERİN TOPLUMSAL KABULÜ: ELEKTRİKLİ ARAÇLARA YÖNELİK DAVRANIŞSAL NİYETİN ANALİZİ

Dr. Salih Yıldırım¹, Erdem Söyler²

¹Bursa Uludağ Üniversitesi, Görükle Mahallesi, Üniversite-1 Caddesi, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, No: C, Daire: BATEG Laboratuvarı TÜRKİYE
Tel: 224 294 10 98 E-Posta: salihyildirim@uludag.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1237-8214>

²Bursa Uludağ Üniversitesi, Görükle Mahallesi, Üniversite-1 Caddesi, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, No: C, Daire: BATEG Laboratuvarı TÜRKİYE
Tel: 224 294 10 98 E-Posta: erdemsoyler@uludag.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5627-6696>

Özet – Küresel ölçekte birçok ülkede elektrikli araçlar hızla yaygınlaşmaktadır. Teknolojik bir yenilik süreci olarak elektrikli araçların benimsenmesi sadece teknik yeterlilik, fizibilite veya altyapı yatırımları ile değil aynı zamanda kamuoyunun yenilikçi teknolojilere yönelik algıları, tutumları, bilinç düzeyleri ve bu teknolojileri kullanma niyetleriyle de doğrudan ilişkilidir. Bu süreç, yeni teknolojilerin toplum nezdinde kabulünün ve piyasa adaptasyonunun temel belirleyicilerinden birisidir.

Davranışsal niyet, bireylerin yeni teknolojileri benimsemeye yönelik psikolojik eğilimlerinin anlaşılmasında kullanılan bir göstergedir. Bu gösterge, bireylerin bir teknolojiye ilişkin fayda veya kullanım beklentileri, algılanan kullanım kolaylığı ya da zorlukları, maliyet ve altyapıya yönelik değerlendirmeleri gibi çeşitli bilişsel süreçlerin birleşimiyle oluşan bir eğilimi temsil etmektedir. Genişletilmiş Teknoloji Kabul Modeli, davranışsal niyetin bir teknolojiyi kullanma davranışının en güçlü ve güvenilir belirleyicilerinden biri olduğunu ortaya koymaktadır. Elektrikli araç sahipliğinin görece düşük düzeyde olduğu Türkiye gibi ülkelerde davranışsal niyetin incelenmesi, toplumun çevreci ve yeni nesil teknolojilere yönelik hazırlık ve uyum kapasitesinin anlaşılması açısından kritik öneme sahiptir. Bu çerçevede niyetin analizi, elektrikli araçların yaygınlaşmasını destekleyecek politika, teşvik ve iletişim stratejilerinin geliştirilmesine kuramsal bir arka plan sunmaktadır.

Bu kapsamda çalışmanın amacı, Türkiye’de elektrikli araçlara yönelik algılanan kullanım beklentisi ve algılanan kullanım zorlukları ile davranışsal niyet arasındaki ilişkiyi araştırmaktır. Araştırma kapsamında, 2025 yılında Türkiye genelinde gerçekleştirilen ve 1092 katılımcıyı kapsayan anket verileri ile regresyon modeli tahmin edilmiştir. Tahmin sonuçları, Türkiye’de elektrikli araçların toplumsal kabulünde algılanan kullanım beklentisinin güçlü, algılanan

kullanım zorluklarına ilişkin algının ise daha sınırlı bir etkiye olduğunu göstermektedir. Elde edilen sonuçlarda Türkiye’de elektrikli araçlara ilişkin farkındalığın olduğu, algısal değerlendirmelerin davranışsal niyeti desteklediği bulunmuştur. Bu sonuçlar, genişletilmiş teknoloji kabul modelini desteklemekte; bu doğrultuda kamu politikalarının kullanım algısını güçlendirmeye, kullanıcı bilgilendirmesini artırmaya ve gelir grupları arasındaki farklılıkları azaltmaya yönelik olarak tasarlanmasının, elektrikli araçların toplumsal kabulünü hızlandırabileceğini göstermektedir.

Anahtar sözcükler: Davranışsal niyet; Algılanan kullanım beklentisi; Algılanan kullanım zorlukları; Elektrikli araçlar; Teknoloji benimseme; Genişletilmiş teknoloji kabul modeli

1. GİRİŞ

Düşük karbonlu ekonomilere doğru geçiş süreci, küresel ölçekte ulaşım sektörünü köklü bir şekilde yeniden yapılandırmakta ve geleneksel fosil yakıt temelli mobilite sistemlerinin yerini elektrikli, hibrit ve çeşitli alternatif yakıtlı teknoloji çözümlerine terk etmesini zorunlu kılmaktadır. Bu dönüşüm, iklim değişikliği ile mücadele, hava kalitesinin iyileştirilmesi ve kaynak verimliliğinin artırılması gibi çevresel önceliklerle doğrudan ilişkili olup, sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmak adına kritik bir adım olarak değerlendirilmektedir. Bu bağlamda elektrikli araçlar, sadece enerji tüketiminde sağladıkları yüksek verimlilik ile değil, aynı zamanda karbon emisyonlarını önemli ölçüde azaltma potansiyelleri sayesinde de küresel ölçekte temel teknolojik bir yenilik olarak kabul edilmektedir.

Günümüzde birçok ülke, politika araçları ile batarya ve elektrikli araç teknolojilerini desteklemektedir. Fakat bu teknolojilerin yaygın bir şekilde benimsenip başarının

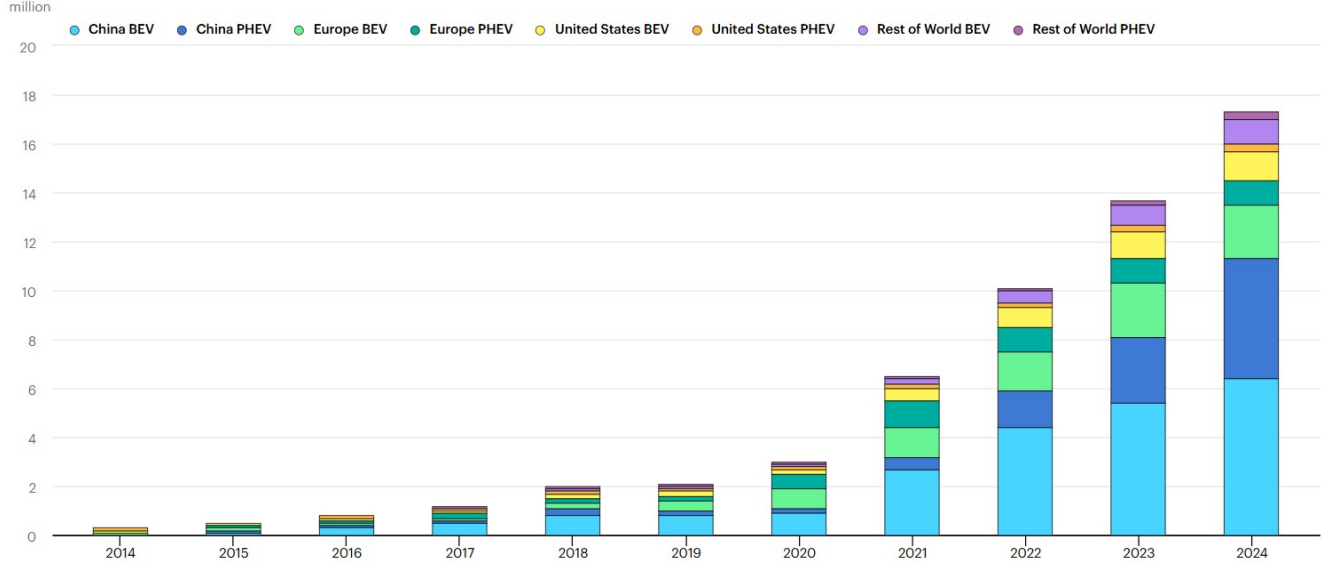
sağlanabilmesi, sadece teknik yeterlilik, finansal destek veya altyapı yatırımları ile açıklanamayacak kadar çok boyutlu ve karmaşık bir süreçtir. Toplumun yenilikçi teknolojilere yönelik algıları, tutumları, bilinç düzeyleri ve bu teknolojileri kullanma niyetleri, sosyal kabulün ve dolayısıyla piyasa adaptasyonunun belirleyici unsurları olarak süreç içerisinde merkezi bir rol üstlenmekte; bu faktörlerin dikkate alınması, politika yapımcılar ve sektörel paydaşlar tarafından sürdürülebilir dönüşüm stratejilerinin başarısı için gerekli görülmektedir. Ayrıca, toplumun geniş kesimlerinin elektrikli araçlar ve diğer düşük karbonlu ulaşım teknolojilerine ilişkin bilgiye erişimi, farkındalığın artırılması ve olumlu davranışsal değişimlerin teşvik edilmesi, uzun vadeli iklim hedeflerine ulaşmada kritik unsurlar arasında yer almaktadır.

Literatürde toplumun yeni bir teknolojiyi kullanma veya benimseme kararlarının, teknolojiye ilişkin bilişsel değerlendirmeleri tarafından şekillendiğini ileri süren, literatürde yaygın kabul göre modellerden biri Davis'in (1989) geliştirdiği teknoloji kabul modelidir. Bu modelin genişletilmiş versiyonu (Venkatesh ve Davis, 2000), bireylerin bir teknolojiyi kabul etme sürecinin büyük ölçüde teknolojiye atfettikleri faydalara ve zorluklara ilişkin

algılarıyla şekillendiğini açıklamaktadır. Elektrikli araçlar açısından algılanan kullanım beklentisi veya faydalar ekonomik tasarruf, çevresel avantajlar, performans beklentisi ve teknolojik yeterlilik algısını kapsarken, algılanan zorluklar fiyatının yüksekliği, şarj istasyonu sayısının yetersizliği, menzil kaygısı, emniyet sorunu, bakım ve onarım maliyeti, ikinci el piyasasına ilişkin endişeleri içermektedir. Bu çerçevede literatürde elektrikli araçlara yönelik algısal değerlendirmelerin, niyeti ve davranışı doğrudan etkilediği bazı çalışmalarda (Cabrera-Sánchez ve Villarejo-Ramos, 2020; Jaiswal vd., 2021; Wang vd., 2018; Adu-Gyamfi vd., 2024; Junquera vd., 2016; Featherman vd., 2021) ortaya konulmaktadır.

Son yıllarda küresel ölçekte elektrikli araçlara yönelik artan bir ilgi bulunmaktadır. Bu doğrultuda, Avrupa Birliği ve benzeri gelişmiş ülkelerde belirlenen iklim hedefleri, uygulamaya konulan politikalar ve teknolojik ilerlemelerin elektrikli araç satışlarının artışında etkili olduğu söylenebilir. Elektrikli araçlara yönelik politik teşvikler (vergi indirimleri, şarj altyapısının desteklenmesi, ÖTV muafiyetleri) hem Avrupa'da hem de diğer ülkelerde tüketici talebinin yükselmesine katkı sağlamaktadır.

Şekil 1. Küresel Elektrikli Otomobil Satışları, 2014-2024

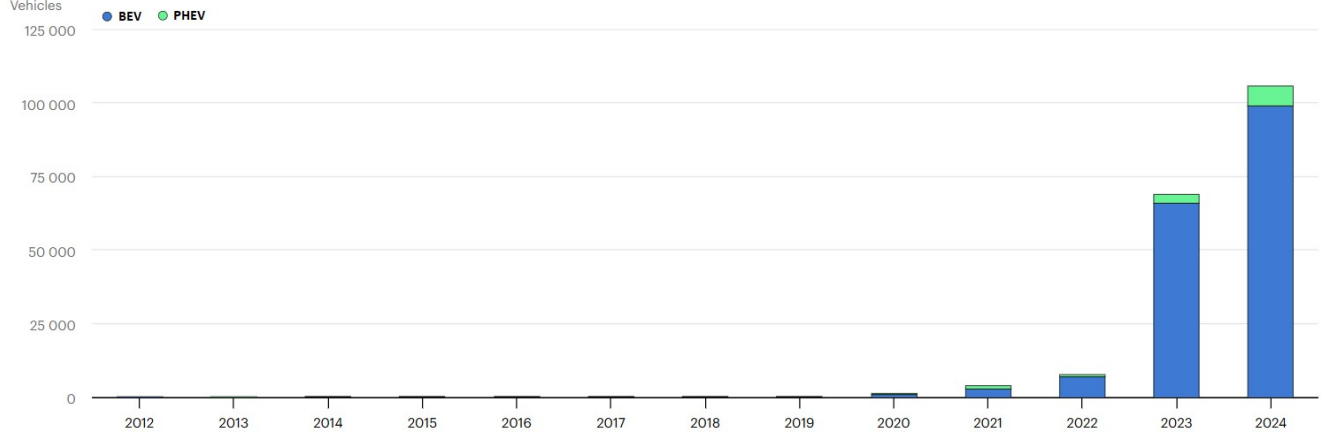


Kaynak: International Energy Agency (2025).

Şekil 1'den hareketle 2024 yılında dünya genelinde 16 milyondan fazla elektrikli otomobil satıldığı ve küresel pazar payının %20'ye ulaştığı görülmektedir. Bu küresel ivme, Türkiye'de de son yıllarda belirgin şekilde

hissedilmekte; elektrikli araç ekosistemi, artan marka çeşitliliği, gelişen şarj altyapısı ve yerli üretim hamleleriyle dikkat çekici bir büyüme sergilemektedir.

Şekil 2. Elektrikli Araç Satışları, Otomobiller, Türkiye, 2012-2024

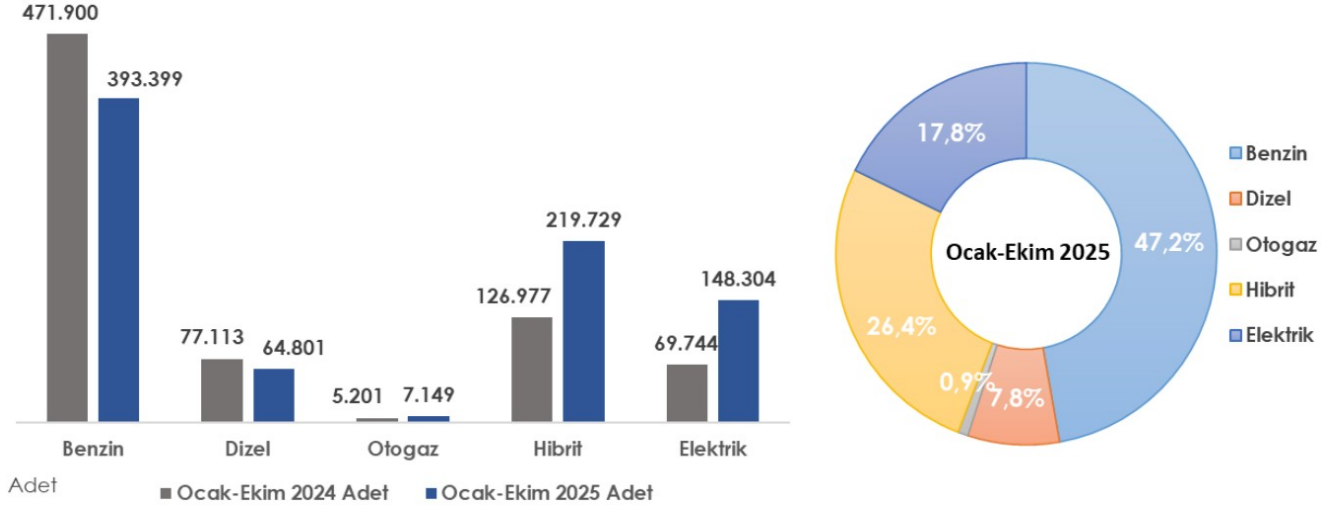


Kaynak: International Energy Agency (2025).

Şekil 2’de görüldüğü üzere, Türkiye’de elektrikli araç satışları, son birkaç yıldır hızlı bir şekilde artmaktadır. Özellikle 2023 yılından itibaren bu yükseliş hızlanmıştır. Diğer yandan, Türkiye’de geleneksel fosil yakıt temelli

araçların halen baskın konumda olması, elektrikli araç sahipliğinin görece düşük seviyelerde kalmasına neden olmaktadır.

Şekil 3. Türkiye’de Otomobil Pazarı Motor Tipine Göre Adetler ve Dağılım



Kaynak: Otomotiv Distribütörleri ve Mobilite Derneği (2025).

Şekil 3’te, Türkiye’de elektrikli otomobil pazarının 2024 yılının aynı dönemine göre büyüdüğü görülmektedir. Aynı zamanda bu trendin 2025 yılında da devam etmesi beklenmektedir. Bir yandan şarj istasyonlarının kademeli olarak yaygınlaşması, devlet teşviklerinin çeşitlenmesi ve yerli üretim yatırımlarının artması sektörde önemli bir dönüşüm potansiyeli yaratırken diğer yandan, tüketici algıları ve beklentileri politika ve piyasa süreçlerinin kritik bir bileşeni haline gelmektedir. Bu nedenle, Türkiye gibi elektrikli araç sahipliğinin görece düşük olduğu toplumlarda kamuoyunun çevreci ve yeni teknolojilere yönelik mevcut düzeyinin anlaşılması büyük önem taşımaktadır.

2. VERİ VE MODEL

Bu çalışmada, elektrikli araçların toplumsal kabulü bağlamında elektrikli araçlara yönelik algılanan kullanım beklentisi ve algılanan kullanım zorlukları ile davranışsal niyet arasındaki ilişki araştırılmaktadır. Araştırma kapsamında, 2025 yılında Türkiye genelinde gerçekleştirilen ve 1092 katılımcıyı kapsayan kapsamlı bir anket formu oluşturulmuştur. Bu anket formunda yer alan sorulardan elde edilen yanıtlar, veri temizleme, kodlama ve güvenilirlik analizleri gibi aşamaları içeren sistematik bir veri hazırlama sürecinden geçirilmiştir. Anket formunda yer alan ve bu çalışma için kullanılan soru ve ölçekler Tablo 1’de yer almaktadır.

Tablo 1. Ölçekler ve Soru Tanımları

Soru no	Ölçeklere ait soru tanımları
<u>Davranışsal niyet</u>	
1.1	Eğer şu an yeni bir araç alma şansım olsa, bunun elektrikli bir araç olmasını isterim.
<u>Algılanan kullanım beklentileri</u> (Cronbach's Alpha: 0,849)	
2.1	Petrole olan bağımlılığımızı azaltacaktır.
2.2	Daha az bakım maliyetine sahip olacaktır.
2.3	Çevre kirliliğini giderecektir (Sera gazı salınımını azaltacaktır).
2.4	Görünümleri daha cezbedicidir.
2.5	Daha konforludurlar.
2.6	Daha güvenlidirler.
2.7	Ülke ekonomisine daha fazla katkı sağlar.
2.8	Sürdürülebilirlikleri daha yüksektir.
<u>Algılanan kullanım zorlukları</u> (Cronbach's Alpha: 0,817)	
3.1	Fiyatları çok yüksek.
3.2	Menzil sorunları var (Dolu bir bataryayı kısa bir mesafe sonra yeniden şarj etmek gerekiyor).
3.3	Emniyet sorunları var.
3.4	Şarj istasyonu sayısı az.
3.5	Şarj etme süresi çok uzun.
3.6	Şarj etme maliyetleri yüksek.
3.7	Bataryanın (8-10 yıl sonra) yüksek maliyet ile değiştirilmesi gerekiyor.
3.8	İkinci el piyasası yok.
3.9	Kişisel veri güvenliği sorunları vardır.
3.10	Bakım ve onarım sorunları vardır.

Kaynak: Yazarların kendi çalışmalarıdır.

Tablo 1'e göre algılanan kullanım beklentisi ve zorlukları ölçeklerinin Cronbach's Alpha değerleri %80'nin üzerindedir. Bu sonuç, kullanılan ölçeklerin güvenilirliğinin yüksek olduğunu göstermektedir. Çalışmada niyet sorusu ve ölçeklerden değişkenler oluşturulmuştur. Bu doğrultuda çalışmada bağımlı değişken davranışsal niyet iken, bağımsız değişkenler algılanan kullanım beklentisi ve algılanan kullanım zorluklarıdır. Gelir, eğitim ve yaş kontrol değişkeni olarak kullanılmıştır. Tablo 2, söz konusu değişkenleri bir araya getirmektedir.

Tablo 2. Kullanılan Değişkenler ve Tanımları

Sembol	Değişkenler
INT_i	Davranışsal niyet
PU_i	Algılanan kullanım beklentileri
PB_i	Algılanan kullanım zorlukları
INC_i	Gelir
AGE_i	Yaş
EDU_i	Eğitim

Bununla birlikte, çalışmada kullanılan değişkenler arasındaki etkileşimin yönü ve şiddetini belirlemek amacıyla korelasyon analizi yapılmıştır. Söz konusu doğrusal ilişkiler, korelasyon katsayıları aracılığıyla hesaplanmış ve ulaşılan sonuçlar Tablo 3'te sunulmuştur.

Tablo 3. Pearson Korelasyon Değerleri

Değişkenler	INT_i	PU_i	PB_i	INC_i	AGE_i	EDU_i
INT_i	1,00					
PU_i	0,36	1,00				
PB_i	-0,09	-0,21	1,00			
INC_i	0,06	0,01	0,04	1,00		
AGE_i	0,04	0,01	0,07	0,07	1,00	
EDU_i	0,03	-0,01	0,01	0,25	-0,13	1,00

Kaynak: Yazarların kendi çalışmalarıdır.

Tablo 3'te verilen korelasyon matrisi doğrultusunda, INT ile PU arasında pozitif, INT ile PB arasında negatif bir korelasyon olduğu gözlenmiştir. INC, AGE ve EDU

değişkenlerinin korelasyon katsayıları küçük ve zayıf düzeydedir.

Ele alınan değişkenler kapsamında oluşturulan beş farklı model, klasik olağan en küçük kareler (OLS) regresyon yöntemi kullanılarak tahmin edilmiştir. Bu yöntem, algısal faktörlerin bireylerin elektrikli araç kullanımına yönelik niyetleri üzerindeki etkisini ampirik olarak açıklamaya olanak sağlamaktadır.

Modeller matematiksel olarak sırasıyla:

$$INT_i = \beta_0 + \beta_1 PU_i + \beta_2 PB_i + v_i \quad (1)$$

$$INT_i = \beta_0 + \beta_1 PU_i + \beta_2 PB_i + \beta_3 INC_i + v_i \quad (2)$$

$$INT_i = \beta_0 + \beta_1 PU_i + \beta_2 PB_i + \beta_3 INC_i + \beta_4 INC_i^2 + v_i \quad (3)$$

$$INT_i = \beta_0 + \beta_1 PU_i + \beta_2 PB_i + \beta_3 INC_i * AGE_i + v_i \quad (4)$$

$$INT_i = \beta_0 + \beta_1 PU_i + \beta_2 PB_i + \beta_3 INC_i * EDU_i + v_i \quad (5)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada, INT_i , i 'inci katılımcının davranışsal niyetini, PU_i , i 'inci kişinin algılanan kullanım beklentilerini, PB_i , i 'inci kişinin algılanan kullanım zorluklarını, INC_i , i 'inci kişinin aylık toplam hanehalkı gelirini, INC_i^2 , i 'inci kişinin aylık toplam hanehalkı gelirinin karesini, AGE_i , i 'inci kişinin yaşını, EDU_i , i 'inci kişinin eğitim durumunu, β_k , $k = 0,1,2,3,4$ olmak üzere sırasıyla sabit terim ve eğim parametrelerini ve v_i , rassal hata terimini göstermektedir.

Tablo 4. Modelin OLS Tahmin Sonuçları

Modeller / Değişkenler	Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Model 5
C	1,71***	1,17***	1,75***	1,26***	1,23***
PU_i	0,47***	0,59***	0,57***	0,58***	0,59***
PB_i	-0,05	-0,04	-0,03	-0,04	-0,04
INC_i		0,04*	-0,22**		
INC_i^2			0,03**		
$INC_i * AGE_i$				0,01*	
$INC_i * EDU_i$					0,01**

Not(lar): *, $p < 0,10$; **, $p < 0,05$; ***, $p < 0,01$ düzeyinde anlamlılığı göstermektedir. (Kaynak: Yazarların kendi çalışmalarıdır.)

Tablo 4’de tahmin edilen regresyon modellerindeki katsayılar, bağımsız değişkenlerin bağımlı değişken üzerindeki marjinal etkisini göstermektedir.

3. BULGULAR

Bulgularımız, algılanan kullanım beklentisinin davranışsal niyet üzerinde pozitif ve istatistiksel olarak anlamlı bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir ($\beta_1 = 0,475-0,590$ aralığı, $p < 0,001$). Buna karşılık algılanan kullanım zorluklarının davranışsal niyet üzerindeki etkisi negatif olsa da istatistiksel olarak anlamlı değildir. Gelir anlamlılık sınırında ve pozitif yönlüdür ($\beta_3 = 0,04$, $p = 0,052$), bu da gelir arttıkça niyetin kısmen güçlendiğini göstermektedir. Gelirin karesinin davranışsal niyet üzerindeki etkisi pozitif ve istatistiksel olarak anlamlıdır ($\beta_4 = 0,026$, $p = 0,013$). Gelir arttıkça niyet başlangıçta artmaktadır; ancak belirli bir eşğin üzerinde gelir düzeyinin yükselmesiyle niyet daha güçlü biçimde artmaktadır. Yaş ve gelir etkileşiminin davranışsal niyet üzerindeki etkisi pozitif ve anlamlıdır ($p = 0,08$). Eğitim ve gelir etkileşimi davranışsal niyet üzerinde pozitif ve istatistiksel olarak anlamlı bir etkiye sahiptir ($\beta_5 = 0,01$, $p = 0,039$).

4. SONUÇ

Bu çalışma, Türkiye’de elektrikli araçlara yönelik algılanan kullanım beklentisi ve zorlukları ile davranışsal niyet arasındaki ilişkiyi incelemektedir. 1092 katılımcıyı kapsayan anket verilerine dayanan çalışmada, algısal faktörlerin katılımcıların elektrikli araç kullanımına yönelik niyetleri üzerindeki etkisi ampirik olarak araştırılmıştır.

Tahmin edilen regresyon modelinden ulaşılan sonuçlar, Türkiye’de elektrikli araçların toplumsal kabulünde algılanan kullanım beklentisinin güçlü, algılanan kullanım zorluklarına ilişkin algının ise daha sınırlı bir etkide olduğunu ortaya koymaktadır. Bu sonuçlar, genişletilmiş teknoloji kabul modelini desteklemekte ve Türkiye’de elektrikli araçlara yönelik niyetin daha çok algılanan kullanım beklentisi tarafından şekillendiğini ortaya koymaktadır. Sonuç olarak, Türkiye’de elektrikli araçlara ilişkin farkındalığın olduğu, algısal değerlendirmelerin davranışsal niyeti desteklediği belirtilebilir. Bu süreçte düşük gelir gruplarını destekleyici kamu politikaları, sektörel stratejiler ve kamuoyu iletişimi elektrikli araçların toplumsal kabulünü hızlandıracaktır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma hazırlanırken, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) 1004 - Mükemmeliyet Merkezi Destek Programı, 22AG001 kodlu projesi ve Bursa Uludağ Üniversitesi (BUÜ) Bilimsel Araştırma Projeleri - Genel Araştırma Projesi, SGA-2024-1513 kodlu projesi tarafından desteklenmiştir.

5. REFERANSLAR

- [1] Adu-Gyamfi, G., Asamoah, A. N., Obuobi, B., Nketiah, E., & Zhang, M. (2024). Electric mobility in an oil-producing developing nation: Empirical assessment of electric vehicle adoption. *Technological Forecasting and Social Change*, 200(November 2023), 123173.
<https://doi.org/10.1016/j.techfore.2023.123173>
- [2] Cabrera-Sánchez, J.-P., & Villarejo-Ramos, Á. F. (2020). Acceptance and use of big data techniques in services companies. *Journal of Retailing and Consumer Services*, 52, 101888.
<https://doi.org/10.1016/j.jretconser.2019.101888>
- [3] Davis, F. D. (1989). Perceived Usefulness, Perceived Ease of Use, and User Acceptance of Information Technology. *MIS Quarterly*, 13(3), 319.
<https://doi.org/10.2307/249008>
- [4] Egbue, O., & Long, S. (2012). Barriers to widespread adoption of electric vehicles: An analysis of consumer attitudes and perceptions. *Energy policy*, 48, 717-729.
<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.06.009>
- [5] Featherman, M., Jia, S. (Jasper), Califf, C. B., & Hajli, N. (2021). The impact of new technologies on consumers beliefs: Reducing the perceived risks of electric vehicle adoption. *Technological Forecasting and Social Change*, 169(May), 120847.
<https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.120847>
- [6] International Energy Agency (2025). Global EV data Explorer, Paris,
<https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/global-ev-data-explorer>
- [7] International Energy Agency (2025). Trends in electric car markets, Paris,
<https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2025/trends-in-electric-car-markets-2>
- [8] Jaiswal, D., Kaushal, V., Kant, R., & Kumar Singh, P. (2021). Consumer adoption intention for electric vehicles: Insights and evidence from Indian sustainable transportation. *Technological Forecasting and Social Change*, 173(November 2020), 121089.
<https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.121089>
- [9] Junquera, B., Moreno, B., & Álvarez, R. (2016). Analyzing consumer attitudes towards electric vehicle purchasing intentions in Spain: Technological limitations and vehicle confidence. *Technological Forecasting and Social Change*, 109, 6–14.
<https://doi.org/10.1016/j.techfore.2016.05.006>
- [10] Otomotiv Distribütörleri ve Mobilite Derneği (2025). Otomobil ve hafif ticari araç pazarı (Ekim, Ocak-Ekim 2025), İstanbul,

<https://www.odmd.org.tr/folders/2837/categorical/docs/5977/ODMD%20Bas%c4%b1n%20Bulteni%204%20Kas%c4%blm%202025.pdf>

- [11] Venkatesh, V., & Davis, F. D. (2000). A Theoretical Extension of the Technology Acceptance Model: Four Longitudinal Field Studies. *Management Science*, 46(2), 186–204.

<https://doi.org/10.1287/mnsc.46.2.186.11926>

- [12] Wang, N., Tang, L., & Pan, H. (2018). Analysis of public acceptance of electric vehicles: An empirical study in Shanghai. *Technological Forecasting and Social Change*, 126(September 2017), 284–291.

<https://doi.org/10.1016/j.techfore.2017.09.011>

Elektrikli Araç Kullanıcılarına İlişkin Algısal Dinamikler: Marmara Bölgesi Örneği

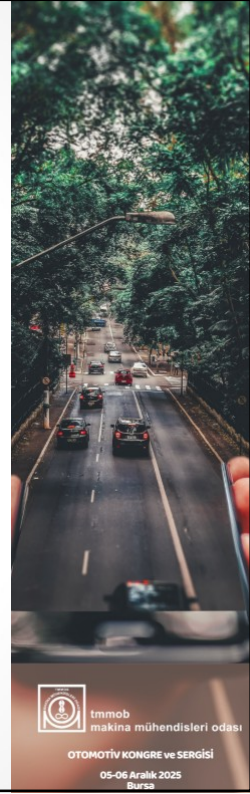
Ecem ÖZKAN¹, Arda GURUŞ²

¹ Dr. Araştırmacı ,Bursa Uludağ Üniversitesi, İktisadi ve İdari Bilimler
Fakültesi,

ecemozkan@uludag.edu.tr

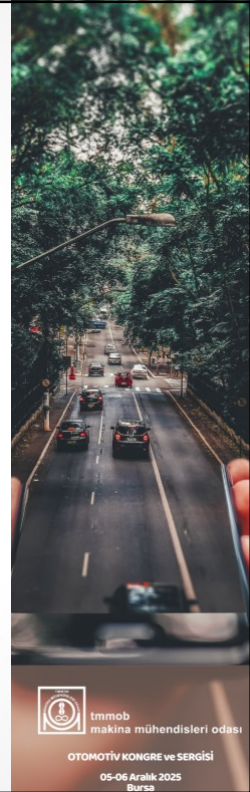
² Prj. Asist. ,Bursa Uludağ Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü,

ardagurus@uludag.edu.tr



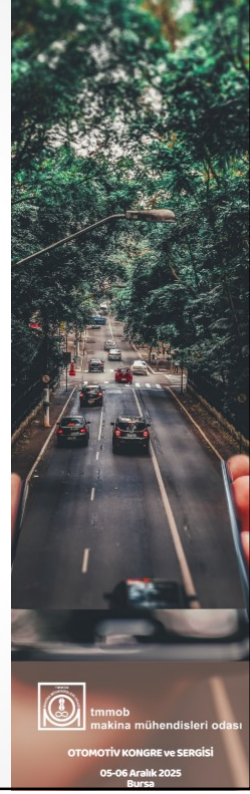
Giriş

- Elektrikli araçlar, çevresel hassasiyet, enerji ekonomisi ve dijitalleşme süreçlerinin etkisiyle hızlı bir dönüşüm yaşamaktadır. Ancak bu dönüşümün merkezinde, kullanıcıların teknolojiye yüklediği anlam ve deneyim yer almaktadır.
- Bu çalışma, kullanıcıların elektrikli araçlara ilişkin algılarını inceleyerek bu yeni teknolojik alanın sosyo-teknik boyutunu görünür kılmayı amaçlamaktadır.



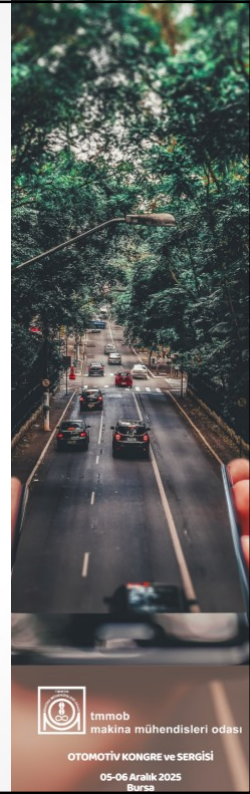
Teorik Çerçeve

- Elektrikli araç teknolojisi, teknik yeniliklerle sınırlı olmayan; kullanıcıların fayda, risk ve deneyim değerlendirmeleriyle şekillenen bir sosyo-teknik yapıdır.
- Kullanıcı algısı bu yapının merkezinde yer alır ve benimseme sürecinin temel belirleyicisidir.
- Bu çalışma, avantaj ve dezavantaj algılarını birlikte değerlendirerek kullanıcı gruplarının nasıl ayrıştığını incelemektedir.



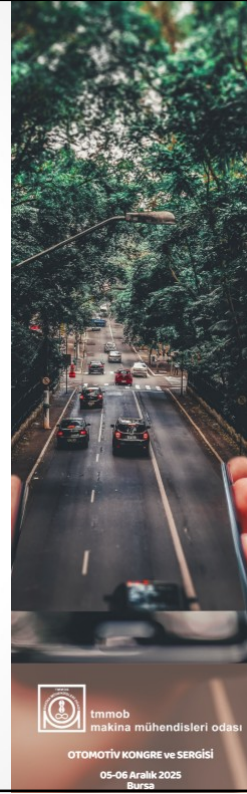
Teorik Çerçeve

- Elektrikli araçlara yönelik tutumlar;
- I. **Teknolojik Kabul Modeli (TAM);** algılanan fayda ve kullanım kolaylığının benimseme
- II. **Teknolojik Direnç Teorisi (IRT);** performans riskleri, güvenlik kaygıları ve altyapı belirsizliklerinin temkinli yaklaşımlar
- Literatür, bu iki mekanizmanın eşzamanlı işlediğini ve kullanıcı kararlarının psikolojik ve deneyimsel unsurlarla biçimlendiğini göstermektedir.



Avantaj ve Dezavantaj Faktörleri

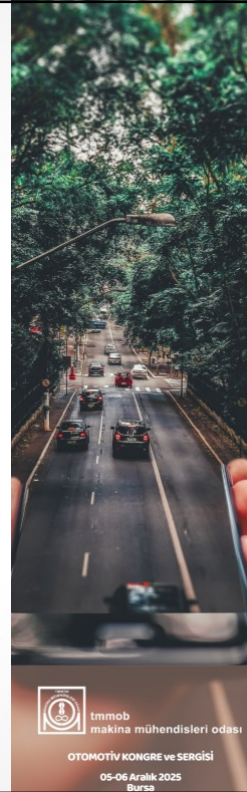
Faktör	İlgili Maddeler	Olası Faktör Anlamı
AVANTAJ ALGISI		
Teknolojik ve Yenilikçi Avantajlar	S.15.8. Vites kutusunun olmaması S.15.9. Yeni teknolojilerin öncüsü olması S.15.10. Kolay hızlanabilmesi S.15.11. Akıllı telefon/aplikasyon uyumu S.15.12. Farklı görünüş S.15.13. Ebat/Boyut sorunu olmaması	Teknoloji, tasarım ve kullanım kolaylığı ile ilişkili avantaj algısı
Çevresel ve Vergisel Avantajlar	S.15.2. Çevre dostu olması S.15.7. Düşük emisyonlu bölgelere kabul S.15.15. Vergi avantajı S.15.6. Özel park alanı	Çevresel duyarlılık ve finansal avantaj boyutu
Konfor ve Sessizlik Avantajı	S.15.5. Konforlu ve sessiz sürüş S.15.3. Evde şarj imkânı S.15.4. Park etme kolaylığı	Sürüş deneyimi ve konfor odaklı avantajlar
Maliyet Avantajı	S.15.1. Düşük enerji maliyetleri S.15.14. Düşük bakım maliyetleri	Ekonomik/maliyet odaklı avantaj algısı
DEZAVANTAJ ALGISI		
Şarj ve Altyapı Kısıtları	S.16.2. Sürüş menzilin kısa olması S.16.3. Şarj süresinin uzun olması S.16.4. Sınırlı şarj istasyonu S.16.5. Servis ve parça desteği sınırlı	Şarj altyapısı ve kullanım kolaylığıyla ilgili teknik dezavantajlar
Gürültü ve Ses Algısı Sorunları	S.16.8. Düşük motor sesi nedeniyle tehlike yaratması S.16.9. Düşük motor sesi sürüş keyfini olumsuz etkiler	Araç ses düzeyine ilişkin güvenlik ve sürüş deneyimi dezavantajı
Performans ve Güvenlik Endişeleri	S.16.7. Hızlanma sorunları S.16.11. Tasarımın sıra dışı olması S.16.12. Güvenlik sorunları	Performans ve güvenlik algısıyla ilişkili dezavantajlar
Ekonomik ve Teknolojik Belirsizlikler	S.16.1. Yüksek fiyat S.16.6. Yeni teknoloji belirsizliği S.16.13. Batarya ömrü kısa S.16.14. Batarya değişim maliyeti yüksek	Finansal yük ve teknolojik belirsizlik odaklı dezavantaj algısı




tmmob
makina mühendisleri odası
OTOMOTİV KONGRE ve SERGİSİ
05-06 Aralık 2025
Bursa

Avantaj ve Dezavantaj Faktörleri

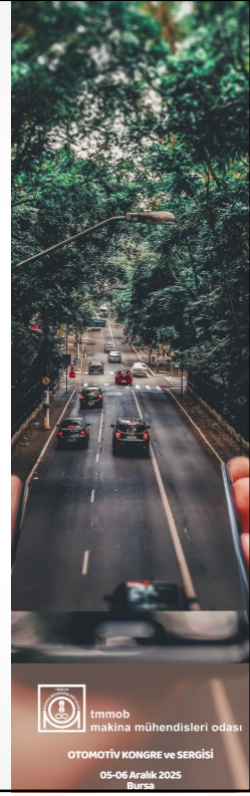
Küme	Katılımcı Sayısı	Yüzde
1	21	%13,1
2	9	%5,6
3	130	%81,3
Toplam	160	%100




tmmob
makina mühendisleri odası
OTOMOTİV KONGRE ve SERGİSİ
05-06 Aralık 2025
Bursa

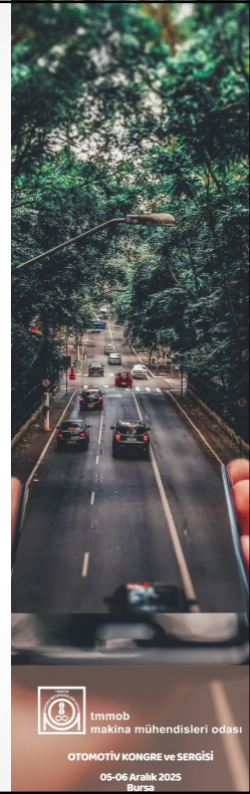
Nihai Algı Boyutları

Faktör	İçerik
A1	Teknolojik-Yenilikçi Avantajlar
A2	Çevresel-Vergisel Avantajlar
A3	Konfor-Sessizlik Avantajı
A4	Maliyet Avantajı
D1	Şarj ve Altyapı Kısıtları
D2	Gürültü ve Ses Sorunları
D3	Performans-Güvenlik Endişesi
D4	Ekonomik-Teknolojik Belirsizlik



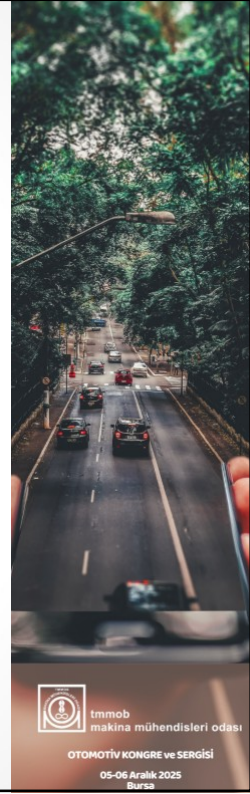
Elektrikli Araç Algısının Çok Boyutlu Yapısı

- Hem kabul hem direnç mekanizmaları birlikte işlemektedir.
- Psikolojik, deneyimsel ve işlevsel unsurlar ekonomik faktörlerden daha belirgindir.
- Kullanıcı profilleri pazarlama, kamu politikası ve altyapı yatırımları açısından yol göstericidir.



Sonuçlar ve Uygulamalı Öneriler

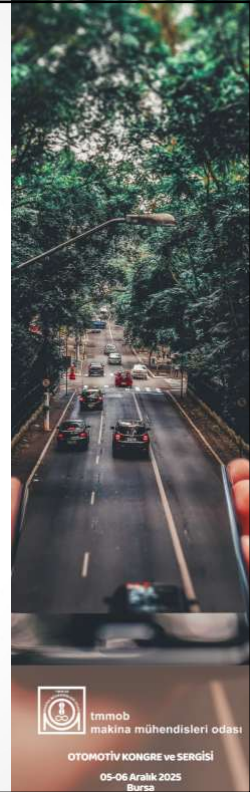
- Elektrikli araç algısı tek boyutlu değil, segmentlere göre değişen bir yapıdadır.
- Altyapı güçlendirmesi, batarya teknolojisi ve ses güvenliği önemli müdahale alanlarıdır.
- Kullanıcı profillerine göre farklılaştırılmış politika önerileri mümkündür.
- Çalışma gelecekte daha geniş örneklerle geliştirilebilir.



Teşekkürler



Bu çalışma **TÜBİTAK 1004 – Mükemmeliyet Merkez Programı** ve **Bursa Uludağ Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP)** tarafından desteklenen SGA-2004-1513 kodlu Genel Araştırma projesi kapsamında hazırlanmıştır. Desteklerinden dolayı TÜBİTAK ve Bursa Uludağ Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyon Başkanlığı'na teşekkür ederiz.



“Otomotiv Sektörü Türkiye Pazarı Bir Durum Analizi Örneği”

Gürcan Özdemir (97505) – Akıllı Ulaşım Sistemleri Yüksek Lisans Öğrencisi
AFK İK – İstanbul Fuar Merkezi / İstanbul
Tel: 0534 574 07 01 E-Posta gurcan.ozdemir@ogr.iu.edu.tr

ÖZET

Endüstri devriminin başlangıcı kabul edilen buharlı makinanın icadından sonra mekanik bilimindeki gelişmeler, elektrik bilimindeki gelişmeler, ortaya çıkan elektronik teknolojileri ve bilgisayar teknolojileri günümüzdeki otomasyon seviyesini oluşturmuştur. Otomobil teknolojisi de bu paralelde gelişim göstermiş, evrelerden geçmiş ve artık yarı otonom - otonom araçlar hayatımızda yer almaktadır. Tüketiciler, araç satın alırken, ekonomik bir süzgeç ile tercihin belirlemektedir. Burada gelir ve fiyat en önemli ekonomik parametreler ve yapılan tercihin sağlayacağı fayda ise tüketicinin tatmin noktasıdır. Bu makalede gelir ve fiyat göz önünde bulundurularak, otonom bir başka deyişle lüks araçları tercih etmenin gerekliliklerini ve faydalarını anlatmak amaçlanmıştır. Makalede Türkiye genelinde son on yıllık kişi başı milli gelir ve otomobil fiyatları ile son on yıllık otomobil satış rakamları arasında regresyon kurulmuş ve bir istatistiksel analiz yapılmıştır. TÜİK verileri ile yapına analiz sonucunda gelirin ve fiyatın otomobil satışları üzerinde etkili olduğu görülmüştür. Bu noktada otonom / lüks araçların gereklilik ve faydalarının anlaşılması ön plana çıkmaktadır. Otonom araçlar ile yapılan daha önceki çalışmalarda otonom araçların avantajları, dezavantajları, otonom araçlara geçiş zorlukları, hukuki boşluklar vs. gibi benzer konular işlenmesine rağmen, otonom araçları gereklilikleri ve faydaları iktisatçı bakışı ile ele alınmamıştır ve makale bu açıdan önem arz etmektedir.

Anahtar Kelimeler: Otonom Araçların Faydaları, Otomobil Sektörü Analiz, Otomotiv Satış Analizi

“Automotive Sector Turkey Market A Situation Analysis Example”

ABSTARCT

After the invention of the steam engine, which is considered the beginning of the industrial revolution, developments in mechanical science, electrical science, emerging electronic technologies and computer technologies have created today's automation level. Automobile technology has also developed in parallel with this, has gone through phases, and now semi-autonomous and autonomous vehicles are in our lives. When purchasing a vehicle, consumers make their choice using an economic filter. Here, income and price are the most important economic parameters and the benefit that the choice will provide is the consumer's satisfaction point. This article aims to explain the requirements and benefits of choosing autonomous, in other words luxury vehicles, considering income and price. In the article, a regression was established between the last ten years of per capita national income and automobile prices and the last ten years of automobile sales figures in Turkey and a statistical analysis was made. As a result of the analysis conducted with TÜİK data, it was seen that income and price were effective on automobile sales. At this point, understanding the necessity and benefits of autonomous / luxury vehicles comes to the fore. Although similar topics such as the advantages and disadvantages of autonomous vehicles, difficulties in transitioning to autonomous vehicles, legal gaps, etc. have been covered in previous studies on autonomous vehicles, the requirements and benefits of autonomous vehicles have not been addressed from an economist's perspective, and this article is important in this respect.

Key Worlds: Benefits of Autonomous Vehicles, Automobile Industry Analysis, Automotive Sales Analysis

1. GİRİŞ

Mal piyasalarında bir malın alımı konusunda tüketicilerin nasıl davranış gösterdiğinin incelenmesi iktisat biliminin konuları arasındadır. İktisat bu konuda arz ve talep ile bunu teorileştirmiş ve tüketicinin davranışının arz ve talebin bulunduğu noktada oluştuğunu söylemiştir. Eğer tüketicinin talebi, yani alım gücü bu noktadan daha fazla ise konu değişmektedir. Böyle bir durumda tüketicilerin nasıl davranacağını tahmin etmek zor olmaktadır. Tüketicinin arayışı istediği tatmin noktasında buluşmakta ve bu nokta ise o malın sahip olduğu özellik ile açıklanmaktadır. Normal şartların üzerinde bir rakamda oluşan bu noktadaki mallar lüks olarak nitelenebilirken, bu konu malın ne olduğundan bağımsızdır. Otomobil tercihi içinde lüks otomobil olarak nitelendirebileceğimiz model, sınıf vs. gibi otomobil türlerinin olduğu ve olacağı düşünülemez, vazgeçilemez bir durumdur. Tüketiciler diğer mal piyasalarında olduğu gibi otomobil piyasasında da bunu istemektedirler. Böyle bir şartlar altında otomotiv sektörü içinde lüks diyebileceğimiz otomobillerin piyasaya sunulması kaçınılmazdır. Otomotiv sektöründe günümüzde son ürün olarak otonom araçlar üzerinde çalışılmakta ve bunların da kendi içerisinde donanımları ile farkları mutlaka bulunmaktadır. Günümüzdeki son ürün olan otonom araç teknolojisi bu piyasada rekabet şartları oluştururken aynı zamanda otomobil piyasasının kendine özgü bir piyasa olduğu da bir başka açıdan ele alınabilir.

Tüketicilerin davranışlarının nasıl olabileceği, konuyu çalışan İktisatçılara atıflar ile aşağıda anlattığım gibi özetlenebilir.

Tüketicinin temel amacının miktarı belli olan ve kısa dönemde değişmeyeceği kabul edilen **gelirinden** sağlayacağı faydayı maksimize ederek dengeye ulaşmak olduğunu biliyoruz. Burada çözümlenmesi gereken sorun şudur: Tüketici, sağlayacağı faydayı maksimize edebilmek için nasıl davranmalıdır? Bir başka ifade ile tüketicinin denge şartı nedir? Tüketici, ihtiyacını giderecek olan mal ve hizmetlerden satın alacağı miktarı öyle düzenlemelidir ki; sonuç itibarıyla, marjinal **faydalar** ile **fiyatlar** arasındaki oran, bütün mallar için eşitlenmelidir (Burada gelir ve fiyatların sabit, azalan marjinal fayda yasasının geçerli olduğu varsayılmaktadır) (Şimşek S., Aydın M.K., 2000).

Günümüzde genel olarak işletmecilikte geniş ölçüde davranış bilimlerinde yararlanılmakta ve konular disiplinlerarası bir yaklaşımla açıklanmaya çalışılmaktadır. Oldukça karmaşık olan tüketici satın alma kararları veya tüketici davranışlarını açıklamada davranış bilimleri çok yararlı ipuçları vermektedir. Tüketicinin satın alma kararlarında; **kültürel, sosyal, psikolojik ve kişisel** faktörlerin güçlü etkileri görülür (Satıcı Ö., 1998).

Otomobile olan talebe yön veren değişkenleri şu şekilde ifade edebiliriz;

- Gelir düzeyi
- Yeni ve ikinci el otomobil fiyatları
- Banka kredi faiz oranları
- Yatırım araçlarının hareketi
- Akaryakıt fiyatları
- Vergi ve harçlar
- Hukuki nedenler
- Sosyo kültürel yapı

bu değişkenlerin ilk altı maddesi doğrudan, diğer maddeleri de dolaylı olarak ekonomik değişkenlerdir. Dolayısı ile otomobile olan talep salt ekonomiye bağlıdır dersek yanlış bir cümle kurmamış oluruz (Ulusçu C., Demir A. O., 2023).

2. OTOMOBİL PİYASASI

Türkiye’de otomobil piyasası; fabrikalardan üretilen yeni araçlarla beslenirken, aynı zamanda ikinci el alım-satımın da yapıldığı bir piyasadır. Tüketicilerin buradaki davranışı otomobillerin diğer mallara göre daha değerli bir mal olmasından ve otomobilin bir yatırım aracı olan bir mal özelliğine sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Bu durumu ile otomobil piyasası farklıdır ve otomobil hem bir ihtiyaçtır hem de bir yatırım malıdır.

3. OTONOM / LÜKS ARAÇ NEDİR?

“Otonom” kelimesi Yunanca kendi kendine (auto) ve kural (nomos) kelimelerinin birleşmesinden oluşan bir kelimedir. Türkçemizde farklı karşılıkları olsa da otonom kelimesi dilimize yer edinmiştir. Tanım gereği kendi kendisini kontrol edebilen her sistem otonom olarak adlandırılır. Otonom araçlar kontrolün sürücüde olduğu koşuldan, sürücüsüz sürüş gerçekleştirebilen araçlara doğru sınıflandırılabilir (Kaynaklar H., 2022).

Otonom sürüş seviyeleri (Otonomluk seviyeleri) için yapılan sınıflandırma aşağıdaki tablodaki gibidir.

Tablo 1: Uluslararası Otomotiv Mühendisleri Birliği Sınıflandırması (SAE)

	Seviye	Tanım
İnsan Kontrolünde Otomasyon	0	Sıfır Otomasyon. Uyarı sistemlerine sahip olabilir ancak sürüşün bütün kontrolü insan sürücüsünde.
	1	Sürücü Yardımı. Sürüş sırasında araç donanımları kullanılarak çevre hakkındaki bilgiler toplanır, yanal veya dikey yönlü sürüş dinamiklerinde sürücüye yardım eder.
	2	Kısmi Otomasyon. Sürüş sırasında araç donanımları kullanılarak çevre hakkındaki bilgiler toplanır, hem yanal hem de dikey yönlü sürüş dinamiklerinde sürücünün kontrolünde olmak şartıyla sürüş yönlendirilir.
	3	Şartlı Otomasyon. Sürüş dinamiklerinin tamamının kontrolü araçtadır. İnsan sürücü sürekli olarak yolu takip etmek zorunda değildir ancak beklenmedik bir durumda sürüşün kontrolünü almaya hazır olmalıdır.
Sürücüsüz Araç	4	Yüksek Otomasyon. Sürüş dinamiklerinin tamamının kontrolü araçtadır. İnsan sürücünün yardımına ihtiyaç duymadan her koşulda sürüş sürdürülebilmektedir.
	5	Tam Otomasyon. Sürüş dinamiklerinin tamamını bir insan sürücü gibi yerine getirebilmektedir.

Kaynak: (SAE International, 2021)

Otomobilin ilk icadından beri otonomluğa geçiş çalışmaları olmakla birlikte, 2000’li yılların başlarından itibaren gelişen bilgisayar teknolojilerinin otomobillere uygulanması bunu hızlandırmıştır. Günümüzde belirli bir rota üzerinde kendi kendine hareket edebilen ulaştırma araçları seviyesine kadar gelinmiş ve ülkemizde de bazı uygulamaları (İstanbul’da İnsansız Metro hattı örneği gibi) mevcuttur. Otomobillerde otonomluğa geçişte kullanılan bazı teknolojiler aşağıdaki gibidir.

(1) Otomobillerde otonomluğa geçişte kullanılan teknolojilerin başında, yukarıda da bahsedildiği gibi Sürüş Destek ve Güvenlik Sistemleri yani ABS, ASR, ESP, ACC, EBA, EBS, EDL vs. gibi sistemler bu omurgayı oluşturmaktadır.

(2) Sürüş Destek Sistemlerinin yanı sıra GPS dediğimiz konumlandırma sistemi otonom araçlarda şu anda mevcut önemli bir teknolojidir.

(3) Lidar ve Radar gibi teknolojileri kullanarak haritalandırma yapmak üzerinde çalışılan bir başka bir teknolojidir.

(4) Haberleşmeyi sağlamak için araçtan ulaşılan internet bağlantısı olmazsa olmaz noktasında bir teknolojidir.

(5) Elektrikli bir özellik kazandırmak yani motor teknolojisinde gelişmeler son yıllarda üzerinde çalışılan bir başka önemli teknolojidir.

(6) Nihayet otonom araç teknolojisinde son noktaya ulaşmak için uçakların kullandığı otopilot teknolojisi özellikle üzerinde çalışılan bir teknolojidir.

4. OTONOM / LÜKS ARAÇLARIN FARKLARI

Otonom araçların diğer araçlardan farklarından bahsettiğimizde bu konun gerekliliği ve faydalarını da anlatmış oluruz. Onun için çalışmada koyduğum başlığın ana teması bu bölümdür. Bu bölümde yaptığım çıkarımlar, sonraki bölümlerde yapacağım analizlere yön vermekte ve önceki bölümlerde anlattığım teoriler doğrultusundadır.

Otonom araçların farkları sahip olduğu özellikler ile anlatılabilir. Bu özelliklerin içerisinde trafik kazalarını azaltması, sağladığı konfor, çevreye duyarlılığı, yakıt tasarrufu vs. sayılabilir.

a) Otonom araçlar trafik kazalarını minimize etmek amacını taşımaktadır.

Sürüş Destek ve Güvenlik sistemleri buna yardımcı olur.

b) Otonom araçlar bir noktadan bir noktaya giderken geçen süreyi minimize etmek amacını taşımaktadır.

GPS yani konumlandırma sistemi ve otopilot uygulaması buna yardımcı olur.

c) Otonom araçlar bir noktadan bir noktaya giderken kullanılan yakıt maliyetini minimize etmek amacını taşımaktadır.

Elektrikli araç teknolojisi buna yardımcı olur.

d) Otonom araçlar karbon emisyonunu azaltmayı ve çevreye verilen zararı minimize etmek amacını taşır.

Elektrikli araç teknolojisi buna yardımcı olur.

e) Otonom araçlar trafik sıkışıklığını minimize etmeyi amaçlamaktadır.

GPS yani konumlandırma sistemi ve otopilot uygulaması buna yardımcı olur.

f) Otonom araçlar trafik güvenliğini maksimize etmek amacını taşır.

Sürüş Destek ve Güvenlik sistemleri, Radar, Lidar uygulamaları buna yardımcı olur.

g) Otonom araçlar yol, hava, çevre şartları hakkında bilgilendirme yapar.

GPS yani konumlandırma sistemi ve araçtaki internet buna yardımcı olur.

5. GELİR DÜZEYİ VE OTOMOBİL SATIŞLARININ İLİŞKİLENDİRİLMESİ

Tablo 2: Yıllara göre (2005-2024), Kişi Başına Düşen Milli Gelir (KBDMG), Otomobil Fiyatları ve Otomobil Satışları Rakamları

	Yıllar	KBDMG (TL)	KBDMG (Dolar)	O. Fiyatları (TL)	O. Satışları
1	2005	6750	7364	25335	723854
2	2006	7300	8000	24859	622341
3	2007	7500	9635	33256	594762
4	2008	13370	10744	32726	494023
5	2009	13221	8972	33298	557126
6	2010	15964	10578	34846	760913
7	2011	18928	11235	33065	864439
8	2012	21037	11615	41847	771762
9	2013	23945	12403	42459	853378
10	2014	26624	11986	41721	767680
11	2015	30056	10822	45494	968017
12	2016	33131	10700	53690	983720
13	2017	39018	10354	60716	956194
14	2018	46172	9307	80505	620937
15	2019	52286	8975	96264	479060
16	2020	60525	8599	127512	772788
17	2021	85671	9539	272079	737350
18	2022	176651	10659	295156	783283
19	2023	311109	13243		1232635
20	2024				1238509

Kaynak: (TÜİK, Otomotiv Sanayii Derneği)

5.1. KİŞİ BAŞINA DÜŞEN MİLLİ GELİR

Milli Gelir, bir ülkede bir yıl içinde üretilen mal ve hizmetlerin toplam değeridir. Bu tanım milli geliri üretim yönünden ifade etmektedir. Gelir yönünden milli gelir ise, bir ülkede üretime katılan tüm üretim faktörü sahiplerinin belli bir dönemde (genellikle bir yıl) elde ettikleri gelirler toplamıdır. Milli gelir harcamalar yönünden de hesaplanabilir. Buna göre bir ülkenin dönemde mal varlığı aynı kalmak şartıyla, harcayabileceği mal ve hizmetler toplamı milli geliri vermektedir. Mili Gelir üretici fiyatları ile Safi Milli Hasıla (SMF) adını alırken, piyasa fiyatları ile Gayrı Safi Milli Hasıla (GSMH) adını alır (Eren A., 2006).

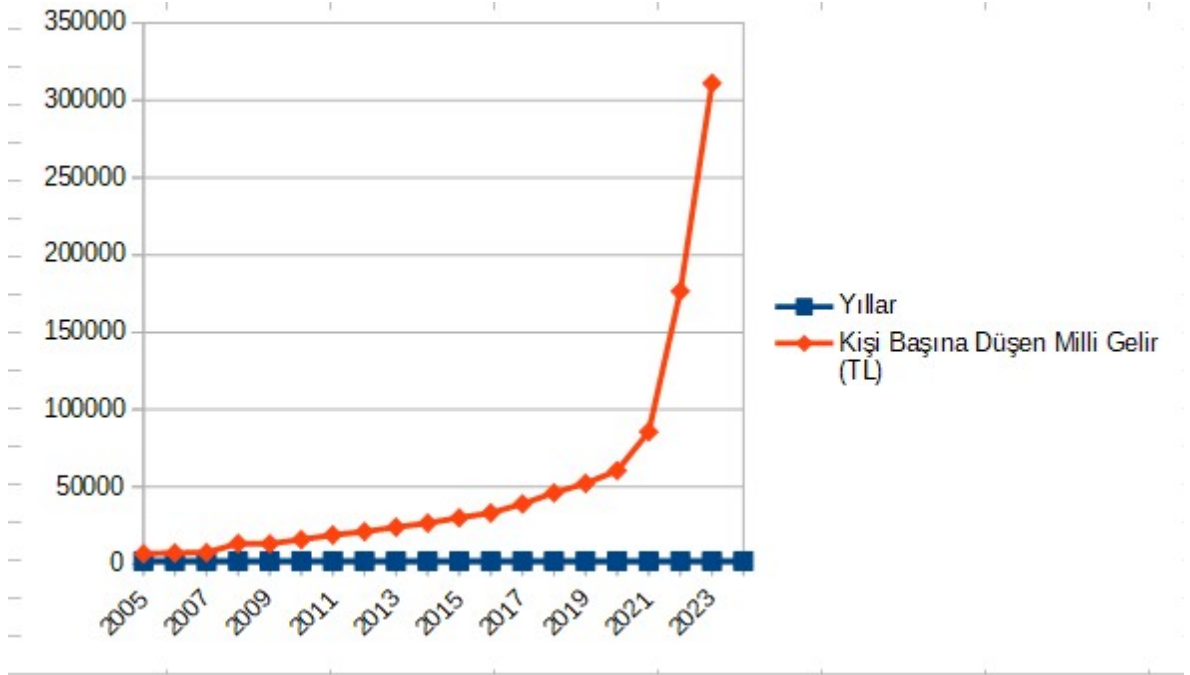
Kişi Başına Düşen Milli Gelir ise, bir ülkenin Milli Gelirinin o ülkenin nüfusuna bölünmesiyle hesaplanmış olur (Eğilmez M., Kumcu E., 2006).

$$\text{Kişi Başına Düşen Milli Gelir} = \text{Milli Gelir} / \text{Nüfus} * 100$$

2005-2024 yılları arasında Türkiye’de Kişi Başına Düşen Milli Gelir rakamları TÜİK hesaplaması ile tablodaki gibidir.

2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
6750	7300	7500	13370	13221	15964	18928	21037	23945	26624
2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
30056	33131	39018	46172	52286	60525	85671	176651	311109	

Bunu grafiğe aktarırsak aşağıdaki gibi olur.



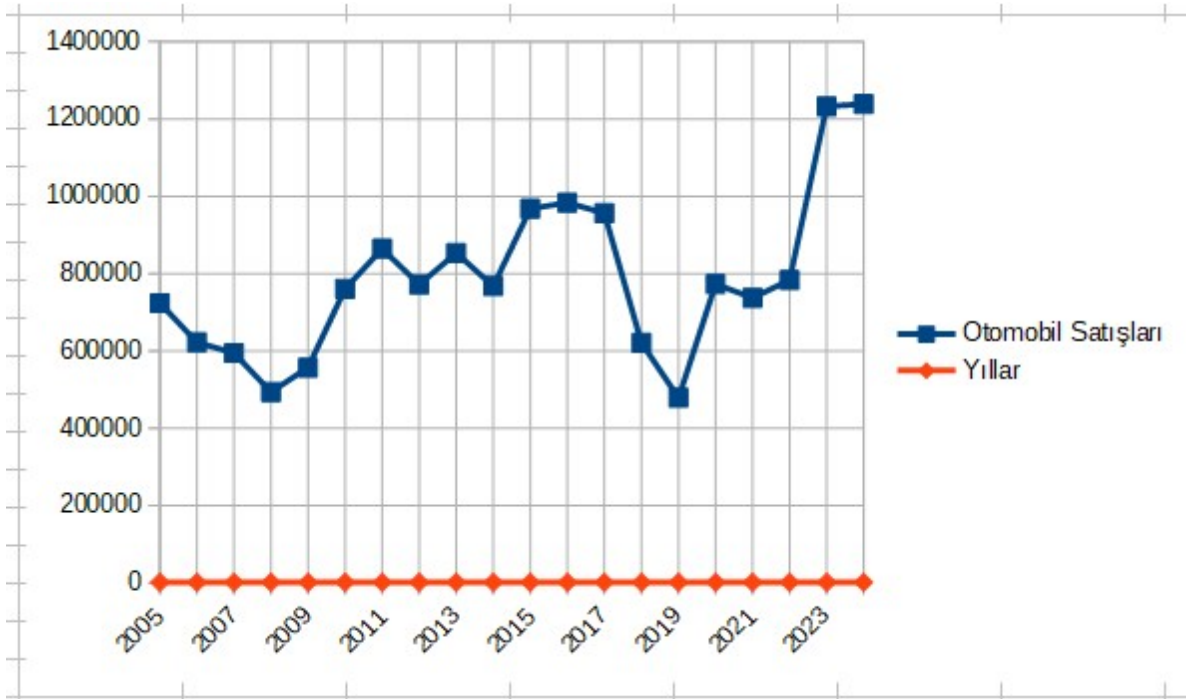
Grafikte görüldüğü gibi Kişi Başına Düşen Milli gelir 2005 – 2024 yılları arasında sürekli artmıştır.

5.2. TÜRKİYE GENELİ OTOMOBİL SATIŞLARI

2005-2024 yılları arasında Türkiye’de otomobil satış rakamları Otomotiv Sanayii Derneği hesaplaması ile tablodaki gibidir.

2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
723854	622341	594762	494023	557126	760913	864439	771762	853378	767680
2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
968017	983720	956194	620937	473060	772788	737350	783283	1232635	1238509

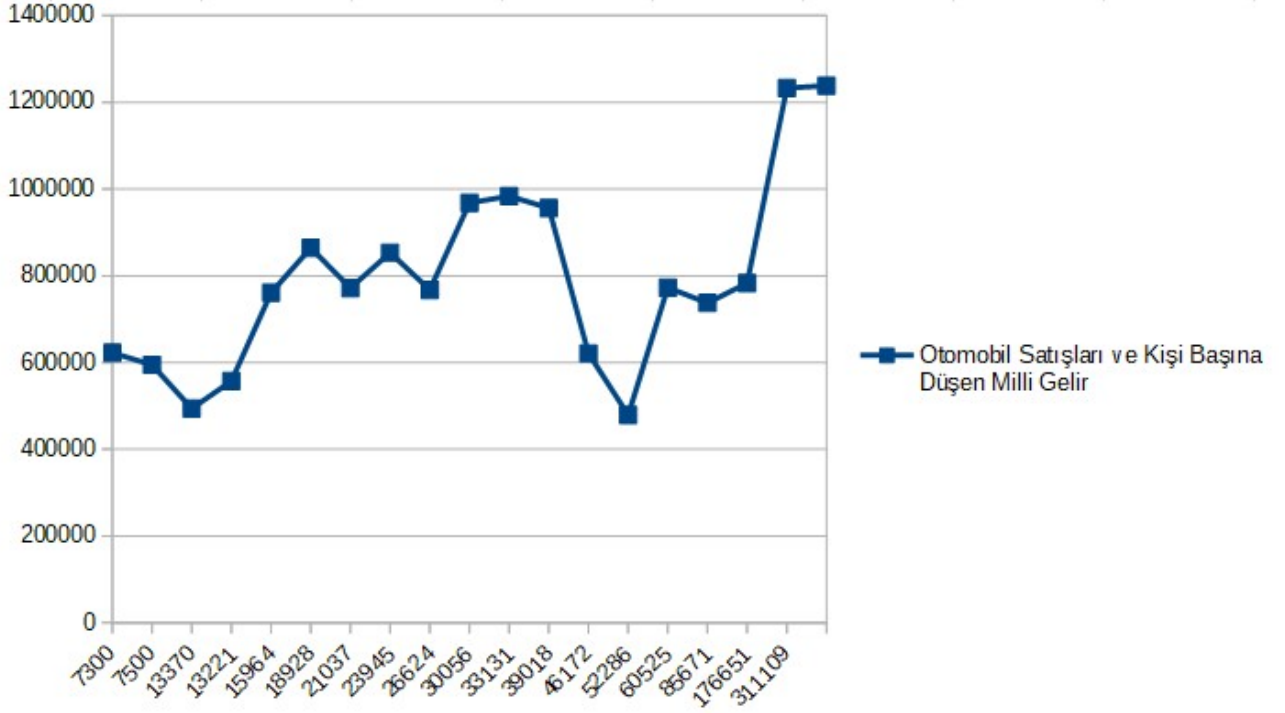
Bunu grafiğe aktarırsak aşağıdaki gibi olur.



Grafikte görüldüğü gibi Otomobil Satışları 2008 ve 2019 yıllarında ekonomik daralma sonucunda dibe inerek iki kez düşüş yaşamış ve sonra yükselmiştir. Genel olarak bakıldığında 2024 yılındaki son geldiği nokta, 2005 yılındaki başlangıç noktasının oldukça üzerindedir ve artmıştır.

5.3. TÜRKİYE’DEKİ KİŞİ BAŞINA DÜŞEN MİLLİ GELİR İLE OTOMOBİL SATIŞLARI ARASINDAKİ REGRESYON VE KORELASYON

Kişi Başına Düşen Milli Gelir ve Otomobil Satışları ortak bir grafikte gösterilmek istenirse aşağıdaki gibi olur.



Grafikten anlayabileceğimiz gibi Kişi Başına Düşen Milli Gelir ve Otomobil Satışlarının buluşma noktası iki kez dibe inerek sonra yükselmiştir. Ancak genel olarak bakılırsa başlangıçtan günümüzde geldiği son nokta ile de görüleceği gibi artış halindedir. Yani arz ve talebin buluşma noktası artış içindedir. Aynı zamanda bu grafik Kişi Başına Düşen Milli Gelir grafiği ile önemli ölçüde benzeşmektedir. Bu Kişi Başına Düşen Milli Gelirin Otomobil Satışları üzerinde etkili olduğunu gösterir. Arz ve Talebin buluşma noktasının artıyor olması, otomobillerin yeni çıkanlarında tatminin arttığına bir işarettir. O halde kurduğumuz kurgu yani Otonom Araçların (Otonomluk Seviyesinin Yükselmesinin bir başka deyişle Otomotiv teknolojilerinde yaşanan gelişmelerin) alıcıları sürekli memnun ettiğini doğrulamaktadır. O halde bu iki değişken üzerinden konuya bakılınca; Otonom Araçların faydaları olduğu ve bunun da hem alıcılar açısından, hem de satıcılar açısından gereklilik meydana getirdiği söylenebilir.

İki değişken için regresyon ve korelasyon analizleri sonuçlarına da bakarsak, grafiğin ötesinde ilişkiyi rakamsal olarak hesaplamak ve tespit etmek de mümkün olmaktadır.

Kişi Başına Düşen Milli Gelir bağımsız değişken olarak ve Otomobil Satışları da bağımlı değişken olarak alınarak regresyon analizi yaparsak, analiz sonuç raporu aşağıdaki gibidir.

Regression						
Regression Model	Linear					
LINEST raw output						
1,42537073332981	691273,821004612					
0,507822852491356	45156,2480386255					
0,316672908719436	159561,386644696					
7,87827603635878	17					
200579616699,107	432817213835,63					
Regression Statistics						
R^2	0,316672908719436					
Standard Error	159561,386644696					
Count of X variables	1					
Observations	19					
Adjusted R^2	0,276477197467638					
Analysis of Variance (ANOVA)						
	df	SS	MS	F	Significance F	
Regression	1	200579616699,107	200579616699,107	7,87827603635878	0,01212983339358	
Residual	17	432817213835,63	25459836107,9782			
Total	18	633396830534,737				
Confidence level	0,95					
	Coefficients	Standard Error	t-Statistic	P-value	Lower 95%	Upper 95%
Intercept	691273,821004612	45156,2480386255	15,3084866664147	2,24049507737394E-11	596002,465456215	786545,176553009
Kişi Başına Düşen Milli Gelir (TL)	1,42537073332981	0,507822852491356	2,80682668441762	0,01212983339358	0,353958168363795	2,49678329829582
Kişi Başına Düşen Milli Gelir (TL)	Predicted Y	Otomobil Satışları	Residual			
6750	700895,073454588	723854	22958,9265454122			
7300	701679,027357919	622341	-79338,0273579193			
7500	701964,101504585	594762	-107202,101504585			
13370	710331,027709231	494023	-216308,027709231			
13221	710118,647469965	557126	-152992,647469965			
15964	714028,439391489	760913	46884,5606085113			
18928	718253,238245078	864439	146185,761754922			
21037	721259,345121671	771762	50502,6548783291			
23945	725404,323214194	853378	127973,676785806			
26624	729222,891408785	767680	38457,1085912155			
30056	734114,763765572	968017	233902,236234428			
33131	738497,778770562	983720	245222,221229438			
39018	746888,936277674	956194	209305,063722326			
46172	757086,038503916	620937	-136149,038503916			
52286	765800,755167494	479060	-286740,755167494			
60525	777544,384639398	772788	-4756,38463939831			
85671	813386,75709971	737350	-76036,7570997097			
176651	943066,986418056	783283	-159783,986418056			
311109	1134719,48448012	1232635	97915,5155198849			

Analiz sonucuna bakıldığında % 31 oranında iki değişken arasında ilişki olduğu görülmektedir. Çok kuvvetli bir ilişki olduğunu söylemek mümkün olmamakla beraber, iki değişkenin aynı yönde bir ilişkisi olduğunu söylemek mümkündür. Yani Kişi Başına Düşen Milli Gelir artarken, Otomotiv Satışları artmaktadır. İki değişken formüle edilmek istenirse;

$$\text{Otomotiv Satışları} = 691273 + 1,42 (\text{Kişi Başına Düşen Milli Gelir})$$

$$Y = 691273 + 1,42 * X$$

şeklinde formüle edilebilir.

Ayrıca F değeri 7,82 ve p değeri 0,012 olarak elde edilmiştir ve $p < F$ olduğu için test ve regresyon denklemi anlamlıdır.

Yeri gelmişken belirtmem gerekir ki; bu çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

6. DEĞERLENDİRME VE SONUÇ

Bu makalede gelir düzeyi arttıkça satın alma tercihinin otonom seviyesi yükselen araçlara doğru yöneldiği ve bunun da otonom araçların faydalarından kaynaklandığını düşünerek otonom araçların faydaları üzerinde durmak amaçlanmıştır. Analizimde kişi başı düşen milli gelir ve otomobil satışları ilişkilendirilerek tatminin gelire bağlı olarak otomobil satışlarını arttırdığı, zaman periyodunda artan satışlarında yeni çıkan otomobillerinde otonomluk derecesini yükselttiği ve otonomluk kavramının fayda sağladığı düşünülmüştür. Yaptığım regresyon testinde kuvvetli bir oran yakalanamamış olmakla beraber ilişki olduğu bulunmuştur. Konuyu gelir dışında ele alarak desteklemek ve literatüre bir göz atmak gerekirse, otomobil satışlarını etkileyen faktörler konusunda yapılmış çalışmalar şöyle özetlenebilir. Yaykaşlı ve Ecemiş (2018) yılında, “Otomobil Satın Alma Probleminde Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleriyle Bir Uygulama” isimli makalesinde Çok Kriterli Karar Verme Yöntemiyle bir uygulama yapmıştır. Uygulamasında otomobil satın almada etkili olan faktörler olarak renk, motor, sınıf ve bagaj hacmi faktörlerini ele almıştır. Uslu ve Demirel (2022) yılında, “Elektrikli Otomobil Satın Alma İstekliliğini Etkileyen Faktörler: Konya İli Örneği” isimli makalesinde Konya ilinde Elektrikli Otomobilleri konu almıştır. Bu çalışmada elektrikli araçlar özelinde otomobil satın almaya etkili olan faktörler incelenmiş, hanehalkı gelirinin arttırılması, elektrikli araç menzilin arttırılması, elektrikli araçlar hakkında bilgi düzeyinin arttırılması, elektrikli araçların reklamlarına destek verilmesi gibi faktörler üzerinde durulmuştur. Çetin (2020) yılında, “Türkiye’deki İthal Otomobil ve Hafif Araç Perakende Satışlarının Döviz Kuru İle İlişkisi” isimli makalesinde Perakende satışlar üzerinde bir çalışma yapmıştır. Döviz kurunda yapılacak %1’lik bir artışın %1,80 ile %1,97 arasında satışları azalttığı tahmin edilmiştir. Kocagöz ve İğde (2022) yılında, “Elektrikli Araç Satın Alma Niyetini Hangi Faktörler Etkiler? Bir Tüketici Araştırması” isimli makalesinde Elektrikli Araçlar üzerinde bir araştırma yapmıştır. Çalışmasında algılanan fiyat değerinin ve çevresel kaygıların elektrikli araç satına almaya pozitif etki ettiği söylenmiştir. Birol (2009) yılında, “Türkiye’de Otomobil Dergiciliği ve Otomobil Dergilerinin Otomobil Satın Alma Üzerine Etkisi” isimli yüksek lisans tezinde Otomobil Dergiciliği ve Dergileri üzerinde durmuştur. Bu tezde otomobil dergisi okurları üzerinde yaptığı araştırmada, otomobil satın alımına karar verirken okurların dergilere birinci önceliği verdiği söylenmiştir. İncekar B., Yılmaz ve İncekar R. (2019) yılında, “Otomotiv Sektöründeki Satınalma Süreçlerinde Bireysel Tüketicilerin Tercihlerinin Analizi: Bir Anket Çalışması” isimli makalesinde bir Anket çalışması uygulamıştır. Çalışmasında otomobil satın alırken otomobil satan yerlerden ve buradaki satış danışmanlarından bilgi almamayı tercih ettiklerini söylemiştir. Büyükyıldırım ve Büyükdoğan (2019) yılında, “Sanayide Marka ve Marka İmajının Tüketicilerin Satın Alma Davranışları Üzerine Etkisi: Otomotiv Sektörü Üzerinde Bir Araştırma” isimli makalesinde Marka ve Marka İmajı üzerinde durmuştur. Çalışmasında memur ve bekar olanların otomobil satın alırken marka imajı algısının daha yüksek olduğu sonucuna varmıştır.

Son bir örnekle, Uluscul ve Demir (2023) yılında, “Otomotiv Tercihinde Tüketici Eğilimleri, Türkiye’de Yeni ve İkinci El Otomobil Satınalma Kararları” isimli makalesinde Yeni ve İkinci El olarak konuyu ele almıştır.

Bu eserlerin içerisinde sadece son verdiğim örnekte Uluscul ve Demirin çalışmasında benim yaptığım analizdeki gibi Kişi Başı Milli Gelir ile Otomobil Satışları arasındaki ilişki incelenmiş, ancak o makalede veri seti 2010 yılı ile 2021 yılı arasındaki verileri kapsamaktadır. Benim hazırladığım makalede YTL’ye geçiş yılı olan 2005 yılı başlangıç alınarak, kişi başı milli gelir için en son açıklanan yıl olan 2023 yılına kadar veriler kullanılmıştır. Benim çalışmamda regresyon metodunu kullandım, regresyon analizimin sonuç raporunda görüldüğü gibi F değeri 7,87 ve p değeri 2,24 olarak çıkmıştır $p < F$ olduğu için regresyon analizim anlamlıdır. Ayrıca analiz raporunda görüldüğü gibi kişi başı milli gelir ile otomotiv satışları üzerinde ilişki kuvvetli olmamakla beraber (%31 oranında) vardır. Ulusçu ve Demir’de metod olarak regresyonu ve

korelasyon metodlarını kullanmış, F değerini 1,321 ve p değerini 0,001 olarak sonuç raporunda bulmuştur. r değerini ise 0,996 olarak bulmuş ve güçlü bir ilişki tespit etmiştir. Literatür taraması yaparak yer verdiğim diğer araştırmalar, makalemin derleme kısmında yer verdiğim Satıcı Ö. ve Ulusçul, Demir'in kedi makalesinde yazdığı gibi otomobil satınalmada tüketici eğilimini etkileyen gelir dışındaki diğer değişkenler üzerine kurulmuştur. Araştırmamı direk olarak değil ama dolaylı olarak ilgilendirdiği için kısaca bunlarada makaleimde yer verdim. Sonuç olarak benim araştırmamda otomobil satın alırken tüketicilerin davranışının tam rasyonel olamayabileceği görülmüş ve gelir ile otomobil satınalma davranışı arasındaki ilişkiden yola çıkarak otonom araçların fayda getirdiği düşüncesini açıklamada yeterli değildir. Otomobil satınalmayı etkileyen gelir dışında diğer değişkenlerinde göz önünde bulundurulması gerekir ve ayrıca tam otonom – sürücüsüz araçlara geçilmesi konusunda yaşanan genel kaygıların sürüyor olması bu trendi etkilemede olası bir durum olabilir.

KAYNAKÇA / REFERANSLAR

Biol, S. (2009). **Türkiye’de Otomobil Dergiciliği ve Otomobil Dergilerinin Otomobil Satın Alma Üzerine Etkisi**, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, İstanbul, Erişim adresi: www.nek.istanbul.edu.tr/ekos/TEZ/45235.pdf

Büyükyıldırım, B. Büyükdoğan, B. (2019). **Sanayide Marka ve Marka İmajının Tüketicilerin Satın Alma Davranışları Üzerine Etkisi: Otomotiv Sektörü Üzerinde Bir Araştırma**, Karatay Sosyal Araştırma Dergisi, Sayı: 3, Sayfa: 157-185. Erişim adresi: www.dergipark.org.tr/tr/download/article-file/1147126

Çetin, A. C. (2020). **Türkiye’deki İthal Otomobil ve Hafif Araç Perakende Satışlarının Döviz Kuru İle İlişkisi**, Sinop Üniversitesi, Sosyal Bilimler Dergisi, Cilt: 4, Sayı: 2, Sayfa 401-432. Erişim adresi: www.dergipark.org.tr/en/download/article-file/1331652

Eğilmez, M. Kumcu, E. (2006). **Ekonomi Politikası Teori ve Türkiye Uygulaması**, Remzi Kitabevi, 10. Basım, Sayfa 123.

Eren, A. (2006). **Türkiye Ekonomisi**, Ekin Kitabevi, 1. Baskı, Sayfa 57.

İncekar, B. Yılmaz, E. İncekar, R. (2019). **Otomotiv Sektöründeki Satınalma Süreçlerinde Bireysel Tüketicilerin Tercihlerinin Analizi: Bir Anket Çalışması**, Akademik Hassasiyetler, Cilt:6, Sayı: 11, Sayfa: 385-404. Erişim adresi: www.dergipark.org.tr/tr/download/article-file/729185

Kaynaklar, H. (2022). **Türkiye’deki Araçların Otonomluk Seviyelerinin Belirlenmesi ve Gelecek Tahmini**, İstanbul Gelişim Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Sayfa 4. Erişim adresi: www.acikerisim.gelisim.edu.tr/server/api/core/bitstreams/751a719d-4782-4543-b67f-1dadbf54ad2/content

Kocagöz, E. İğde, Ç. S. (2022). **Elektrikli Araç Satın Alma Niyetini Hangi Faktörler Etkiler? Bir Tüketici Araştırması**, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Sosyal Bilimler Dergisi, Cilt: 19, Özel Sayı, Sayfa: 104-120. Erişim adresi: www.dergipark.org.tr/tr/download/article-file/2499478

Otomotiv Sanayii Derneği (OSD)

SAE International

Satıcı, Ö. (1998). **Tüketici Pazarları ve Alıcı Davranışları**, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, Ankara, Kasım 1998, Sayfa 4. Erişim adresi: www.researchgate.net/publication/285057211_Tuketici_Davranislarini_Etkileyen_Faktorler

Şimşek, S. Aydın, M. K. (2000). **İktisat Bilimine Giriş**, Değişim Yayınları, Adapazarı, 2. Baskı, Sayfa 65- 67.

Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK)

Ulusçu, C. Demir, A. O. (2023). **Otomobil Tercihinde Tüketici Eğilimleri, Türkiye’de Yeni ve İkinci El Otomobil Satınalma Kararı**, İstanbul Ticaret Üniversitesi Girişimcilik Dergisi, Cilt: 7, Sayı: 13, Sayfa 68. Erişim adresi: <http://www.dergipark.org.tr/en/download/article-file/2916594>

Uslu, H. Demirel, O. (2022).**Elektrikli Otomobil Satın Alma İstekliliğini Etkileyen Faktörler: Konya İli Örneği**, Süleyman Demirel Üniversitesi, Vizyoner Dergisi, Cilt: 13, Sayı: 35, Sayfa 961-975. Erişim adresi: www.dergipark.org.tr/tr/download/article-file/2085240

Yaykaşlı, M. Ecemiş, O. (2018). **Otomobil Satın Alma Probleminde Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleriyle Bir Uygulama**, Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, Cilt: 10, Sayı: 26, Sayfa 967-987. Erişim adresi: www.dergipark.org.tr/tr/download/article-file/612753

YAN SANAYİDE GİZLİ TEHDİT: BURSA OTOMOTİV EKOSİSTEMİNDE BİLGİ GÜVENLİĞİ YOLCULUĞU

Cenk E. Tezel

Günizi Kurumsal Eğitim Müh. Tur. Tic. Ltd. Şti. Üçevler Mh. Ersan Sk. No:8 B Blok Nilüfer Bursa TÜRKİYE
Tel: 533 332 48 01 E-Posta cenktezel@tutulemma.com

özellikle yan sanayi firmalarında bilgi güvenliğine verilen önem ve yatırım seviyesi, bu stratejik öneme paralel değildir.

1. ÖZET

Otomotiv sektörü yüksek teknoloji, hızlı tedarik döngüleri ve küresel rekabetin kesişiminde faaliyet göstermektedir. Ancak yan sanayi firmaları için bilgi güvenliği hâlâ en zayıf halkalardan biridir. Dijitalleşme baskısı, ERP sistemleri, tedarikçi portalları ve dış IT servislerinin artan rolü, bu firmaları siber tehditlere karşı daha savunmasız hale getirmektedir. TISAX, ISO/IEC 27001, ISO/SAE 21434 ve ISO 24089 standartlarının entegrasyonu, yalnızca uyum gerekliliği değil; rekabet avantajı, iş sürekliliği ve müşteri güveni açısından da kritik bir ihtiyaçtır. Bildiri, Türkiye’de otomotiv yan sanayinin mevcut bilgi güvenliği olgunluğunu, ana sanayi beklentilerini ve dış IT servislerinin getirdiği riskleri inceleyerek; iyi uygulamaları ve stratejik önerileri ortaya koymaktadır. Ayrıca, ISO/IEC 27017 ve 27018 gibi tamamlayıcı standartlarla birlikte yerli yazılım ve bulut sağlayıcılar üzerindeki etkiler değerlendirilmektedir. Sonuç olarak bilgi güvenliği, yalnızca teknik bir zorunluluk değil, otomotiv ekosisteminin sürdürülebilirliği için temel bir rekabet faktörüdür.

Anahtar kelimeler: Otomotiv Bilgi Güvenliği, Yan Sanayi ve Tedarikçi Güvenliği, TISAX, ISO/IEC 27001, ISO/SAE 21434, ISO/IEC 24089, ISO/IEC 27017 – ISO/IEC 27018 Cyber Resilience Act (CRA), OEM Beklentileri, Tedarik Zinciri Siber Güvenliği, Bulut Hizmetleri Güvenliği, İş Sürekliliği ve Kriz Yönetimi, Siber Tehditler ve Olay Yönetimi

2. GİRİŞ

Otomotiv sektörü; yüksek teknoloji, hızlı tedarik döngüsü, küresel rekabet ve kalite beklentilerinin kesişiminde faaliyet göstermektedir. Ancak bu ekosistemin belki de en zayıf halkası, bilgi güvenliğidir. Giderek daha fazla dijitalleşen üretim hatları, ERP sistemleri, tedarikçi portalları ve ürün geliştirme süreçleri artık yalnızca operasyonel değil, stratejik birer varlık olarak değerlendirilmektedir. Ancak Türkiye’de

3. TANIMLAR VE KISALTMALAR

TISAX – Trusted Information Security Assessment Exchange (Otomotiv sektörü için bilgi güvenliği değerlendirme ve etiketleme mekanizması)

VDA ISA – Information Security Assessment (TISAX’ın temelini oluşturan VDA kontrol kataloğu)

ISO/IEC 27001 – Bilgi Güvenliği Yönetim Sistemi Standardı

ISO/IEC 27017 – Bulut hizmetleri için bilgi güvenliği kontrolleri kılavuzu

ISO/IEC 27018 – Bulut ortamlarında kişisel verilerin korunmasına yönelik standart

ISO/SAE 21434 – Otomotiv siber güvenliği için yol güvenliği standardı

ISO 24089 – Yazılım güncellemeleri için bilgi güvenliği standardı

OEM – Original Equipment Manufacturer (Ana sanayi üretici firma)

Tier-1 – Ana sanayiye doğrudan ürün/hizmet sağlayan birincil tedarikçi

SLA (Service Level Agreement) – Hizmet Seviyesi Anlaşması

OLA (Operational Level Agreement) – Operasyonel Seviye Anlaşması

SOC (Security Operations Center) – Güvenlik Operasyon Merkezi

RTO (Recovery Time Objective) – Kurtarma Zaman Hedefi

RPO (Recovery Point Objective) – Kurtarma Noktası Hedefi

TARA (Threat Analysis and Risk Assessment) – Tehdit Analizi ve Risk Değerlendirmesi

4. BİLDİRİNİN AMACI VE KAPSAMI

Bu bildirinin amacı, otomotiv yan sanayi firmalarının bilgi güvenliği uygulamalarının mevcut durumunu ortaya koymak, TISAX, ISO/IEC 27001, ISO/SAE 21434 ve ISO 24089 gibi standartların beklentilerini irdeleyerek bu standartların yan sanayi firmalarına getirmesi beklenen yükleri ve görevleri değerlendirmektedir. Bildiri; yaşanmış bilgi güvenliği vakaları, ana sanayilerin tedarikçi beklentileri ve sistematik iyileştirme alanlarına dair somut çıkarımlar da sunmaktadır.

5. BİLGİ GÜVENLİĞİ KAVRAMI VE OTOMOTİV EKOSİSTEMİ

Otomotiv ekosisteminde bilgi güvenliği, hem üretim süreçlerinin hem de tedarik zincirinin bütünlüğünü korumak açısından kritik bir kavramdır. Günümüzde otomobiller; yazılım, bağlantılı servisler, bulut sistemleri ve sensör teknolojileriyle donatılmış karmaşık siber-fiziksel sistemler haline gelmiştir. Bu durum, araçların yalnızca fiziksel değil, aynı zamanda dijital saldırılara da açık olmasına yol açmaktadır. OEM'ler ve tedarikçiler, müşteri verilerinin korunması, üretim hatlarının kesintisiz devam etmesi ve fikri mülkiyetin güvence altına alınması için ISO/IEC 27001, TISAX ve ISO/SAE 21434 gibi standartları uygulamaktadır. Ayrıca, veri gizliliği (KVKK ve GDPR gibi düzenlemelerle) ve iş sürekliliği gereklilikleri de bilgi güvenliği stratejilerinin ayrılmaz parçalarıdır. Sonuç olarak bilgi güvenliği, otomotiv sektöründe yalnızca uyum zorunluluğu değil; güvenlik, güvenilirlik ve rekabet avantajı için de vazgeçilmez bir faktördür.

Otomotiv ekosistemi içinde yer alan bilişim ürün ve hizmet firmaları da ulaşabildikleri veya etkiledikleri bilgi açısından ayrı bir öneme sahiptir. Dış IT servislerinin özellikle de bulut tabanlı hizmet ve ürünlerin yaygınlaşması ile bu tedarikçilerin tüm ekosistem üzerinde bilgi güvenliği ve tedarik zincirinin bütünlüğüne etkisi gün geçtikçe artmaktadır.

6. MEVCUT DURUM VE SORUN ALANLARI

6.1. SİSTEMSEL DÜZEYDE SORUNLAR:

Son yıllarda otomotiv sektöründe yaşanan bilgi güvenliği olayları, üç temel güvenlik kriterinin (gizlilik, bütünlük, erişilebilirlik) ihlal edilmesiyle sonuçlanmıştır:

- Volkswagen/Audi örneğinde, tedarikçilerden birinin portal şifreleri çalınmış ve yetkisiz erişim yoluyla müşteri bilgileri sızdırılmıştır (gizlilik).
- Jaguar/Land Rover, üretim hattındaki sistemlerde sızan zararlı yazılımın nedeniyle üretim durmuştur (bütünlük).
- Toyota, Japonya'daki bazı tedarikçilerinin sistemlerine yapılan DDoS saldırısı sonrası üretim emirlerini işleyememiş, bu da birkaç fabrikada geçici üretim durmasına yol açmıştır (erişilebilirlik).

Bu örnekler, bilgi güvenliği ihlallerinin yalnızca dijital dünyada değil, fiziksel üretim ve sevkiyat süreçlerinde de etkili olabileceğini göstermektedir.

6.2. ÖNDE GELEN OEM'LERİN BİLGİ GÜVENLİĞİ BEKLENTİLERİ (GÜNCEL DURUM)

Aşağıdaki tablo, otomotiv ana sanayi firmalarının bilgi güvenliği konusundaki **güncel** tedarikçi taleplerini özetlemektedir:

OEM	Talep Edilen Bilgi Güvenliği Sistemi / Sertifikası
Renault	TISAX etiketi (zorunlu) – iş birliğine göre Assessment Level 2 veya 3
Stellantis (<i>Peugeot, Citroën, Opel, Fiat, vb.</i>)	TISAX etiketi (zorunlu) – ISO/IEC 27001 artık kabul edilmemektedir
Volkswagen Grubu (<i>VW, Audi, Skoda, Porsche, MAN, vb.</i>)	TISAX etiketi (zorunlu) + ISO/SAE 21434 uyumu beklenmektedir
Ford	ISO/IEC 27001 veya TISAX – her iki sistemden biri kabul edilebilir
BYD	ISO/IEC 27001 veya TISAX – Avrupa operasyonları için
Toyota	Belgelendirme talebi vaka bazlı; ISO/SAE 21434 ve ISO 27001 uyumu istenmektedir
Hyundai	ISO/IEC 27001 önerilmekte; TISAX henüz zorunlu değil, ancak bilgi güvenliği formu ve risk değerlendirme süreçleri yürütülüyor

Şekil 1 OEM'ler Tarafından Talep Edilen Sertifika / Etiketler

Ana sanayi firmaları; tedarikçilerin, kendi portallarına bağlanarak bilgi girişi yaptığı, belge yüklediği ve üretim planlamasını gerçekleştirdiği bir yapı kurmuşlardır. Bu durum, tedarikçi sistemlerine sızan tehditlerin doğrudan ana sanayiye sıçrama riskini artırmaktadır. Dolayısıyla bilgi güvenliği olgunluğu düşük olan tedarikçilerin, tüm zinciri tehdit eden birer zafiyet noktası haline geldiği açıktır.

6.2.1. YAPISAL YETERSİZLİKLER:

- Çoğu yan sanayi firmasında bilgi işlem altyapısı yetersizdir.
- Kritik sistemler dış servislerde veya kısmen yetkin personel tarafından yönetilmektedir.

- Bilgi işlem faaliyetlerine bakış sadece üretim ve sevkiyat faaliyetlerinin yürütülmesi için bir yardımcı aktivite olarak görülmektedir. Bilgi güvenliği kavramı yerleşik değildir.

6.2.2. TEDARİK ZİNCİRİ RİSKİ:

Tedarikçilerin sistemlerine sızan tehditler, doğrudan ana sanayiye sıçrama riski taşımaktadır. Tedarikçiler genellikle ana sanayi portallarına erişerek fatura, lojistik, üretim planlama gibi kritik verileri işlerler. Bu nedenle, ana sanayi firmaları artık tedarikçilerin de kendi bilgi güvenliği sistemlerine sahip olmalarını ve belli bir olgunluk düzeyini karşılamalarını beklemektedir.

6.2.3. REKABET BASKI VE MARJİNAL KÂRLILIK:

Türkiye otomotiv yan sanayi, genel olarak kalite yönetimi konusunda güçlü bir altyapıya sahip olsa da, bilgi güvenliği yönetim sistemleri henüz yaygınlaşmamıştır. Birçok firma bilgi işlem faaliyetlerini ya dış kaynakla çözmekte ya da çok sınırlı bir iç kaynakla yürütmektedir. Bu yaklaşım, dijitalleşme baskısıyla birleşince bilgi güvenliği açıklarına ve sevkiyat sürekliliğinde kesintilere neden olabilmektedir. Özellikle marjinal karlarla çalışan firmalar için bu tür kesintiler ciddi finansal baskılar yaratmaktadır.

GÜÇLÜ YÖNLER	ZAYIF YÖNLER
• Genç ve adaptasyon kabiliyeti yüksek çalışanlar • Teknik kaliteye yatkınlık • OEM taleplerine uyum gösterebilme isteği	• Bilgi işlem altyapısının zayıflığı • Belge ve süreç odaklı yönetim eksikliği • Farkındalık eksikliği ve yetersiz personel
FIRSATLAR	TEHDİTLER
• TISAX ve ISO 27001 gibi sistemlerin standartlaşması • Dijitalleşme fonları ve destekleri • Süreçlerin otomasyonu	• Ana sanayi denetimlerinde elenme riski • Siber saldırılarda artış • Çalışan değişkenliği / bilgi kaybı

Şekil 2 Yan Sanayi SWOT Analizi

7. TÜRKİYE'DE OTOMOTİV YAN SANAYİ VE BİLGİ GÜVENLİĞİ GERÇEKLİĞİ

Türkiye otomotiv yan sanayi, genel olarak kalite yönetimi konusunda güçlü bir altyapıya sahip olsa da, bilgi güvenliği yönetim sistemleri henüz yaygınlaşmamıştır. Birçok firma bilgi işlem faaliyetlerini ya dış kaynakla çözmekte ya da çok sınırlı bir iç kaynakla yürütmektedir. Bu yaklaşım, dijitalleşme baskısıyla birleşince bilgi güvenliği açıklarına ve sevkiyat sürekliliğinde kesintilere neden olabilmektedir. Özellikle marjinal karlarla çalışan firmalar için bu tür kesintiler ciddi finansal baskılar yaratmaktadır.

8. GÜNCEL DURUM VE SORUNLAR

Sistemlerin dijitalleşmesi ve dijital dönüşüm baskısı, bilgi güvenliği zafiyetlerini artırmakta, sevkiyat problemleri yaratmakta ve tedarik zincirini aksatmaktadır.

Bu durum, özellikle marjinal kazançlarla rekabet eden yan sanayi firmaları üzerinde ciddi baskı oluşturmaktadır.

Türkiye'de otomotiv yan sanayinde bilgi güvenliği kavramı ve uygulaması yeterince yerleşmemiştir. Bilgi işlem birimleri çoğu zaman asgari personelle ya da dış kaynakla yönetilmektedir.

Bu yapı, ana sanayinin beklentileri ile uyumlu değildir ve sürdürülebilir bir çözüm sunmamaktadır.

8.1. ORTALAMA BİR YAN SANAYİ FİRMASINDA BİLGİ GÜVENLİĞİ YAPISI

ISO 27001 ve TISAX gibi bilgi güvenliği standartlarına uyum sağlamak için ortalama bir yan sanayi firmasında şu yapıların oluşturulması gerekmektedir:

- Kurumsal sistemler: Bilgi güvenliği politikası, prosedürleri, risk değerlendirme ve iş etki analiz süreçleri.
- Organizasyonel yapı: Bilgi güvenliği yöneticisi atanması, sorumlulukların netleştirilmesi.
- Donanım ihtiyaçları: Uç nokta güvenliği, yedekleme sunucuları, ağ izleme sistemleri.
- Yazılım ihtiyaçları: Erişim kontrol sistemleri, çok faktörlü kimlik doğrulama (MFA), şifreleme çözümleri, SIEM sistemleri.

8.2. YAN SANAYİ FİRMALARININ TEDARİKÇİLERİNDEN BİLGİ GÜVENLİĞİ BEKLENTİLERİ

- Bilgi güvenliği politikalarının varlığı.
- Tedarikçi erişimlerinin kontrollü yapılması.
- Olay müdahale ve kurtarma planlarının olması.
- Bilgi güvenliği sertifikasyonlarının sağlanması (ISO 27001, TISAX, ISO/SAE 21434).

9. TISAX VE ISO 27001'DEN BEKLENENLER

TISAX ve ISO 27001 gibi çerçeveler; tedarikçi firmaların bilgi güvenliği olgunluğunu belirlemek için kullanılmaktadır. Bu standartlar aşağıdaki konulara vurgu yapar:

- Risk temelli yaklaşım: Tüm kararlar risk değerlendirme sonuçlarına dayalı olmalıdır.
- Politika ve prosedürler: Kurumsal bilgi güvenliği politikaları oluşturulmalı ve işletilmelidir.
- Kayıt tutma ve izleme: Loglama, olay yönetimi ve iç denetim süreçleri kurulmalıdır.
- Tedarikçi yönetimi: Dış IT servislerinin seçimi, sözleşmesel ve yasal güvenlik kriterlerine göre yapılmalıdır.
- Kriptografik kontrol: Şifreleme tekniklerinin seçimi ve yönetimi, risk analizleri sonucunda karara bağlanmalıdır.

Her iki yönetim sistemi de genel bilgi güvenliği çerçeveleri gibi ortak kaygıları olan isteklere sahiptir.

ISO(IEC 27001:2022 bilgi güvenliği yönetim sisteminin bilgi güvenliği yapısı ile ilgili uygulama beklentilerini içeren Ek.A (Annex A) ile TISAX'ın aynı yapıyı tanımlayan ISA kontrolleri çok büyük ölçüde örtüşmektedir.

ISO/IEC 27001:2022 Kontrol tanımlayıcısı	TISAX 6.0	Kontrol Adı	ISO/IEC 27001:2022 Kontrol tanımlayıcısı	TISAX 6.0	Kontrol Adı
AS.1	6.1.1	Bilgi güvenliği için politikalar	AS.1	6.1.1	Fiziksel güvenlik sınırları
AS.2	6.2.2	Bilgi güvenliği riskleri ve sorunlulukları	AS.2	6.1.1	Fiziksel erişim
AS.3	6.4.1	Ölçümlerin yapılması	AS.3	6.1.1	Ölçümler, edilebilir ve testlerin güvenliğinin sağlanması
AS.4		Yönetim sorunlulukları	AS.4	6.1.1	Fiziksel güvenlik izleme
AS.5	6.4.1	Ölçümlerin değerlendirilmesi	AS.5	6.1.1	Fiziksel ve çevresel tehditlere karşı koruma
AS.6		Özel bilgi güvenliğine ilişkin	AS.6	6.1.1	Güvenli donatılara erişim
AS.7		Tehdit uyarıları	AS.7		Temiz masa, temiz ekran
AS.8	1.2.3, 5.3.1	Proje yönetiminde bilgi güvenliği	AS.8		Tehditler yönetimine ve koruma
AS.9	6.1.1	Bilgi güvenliği ve diğer ilgili varlıklar	AS.9		Kuruluş dışındaki varlıkların güvenliği
AS.10	1.3.2, 3.1.3	Bilgilerin ve diğer ilgili varlıkların kabul edilebilir kullanımı	AS.10	5.1.4	Depolama ortamı
AS.11	6.1.3	Varlıkların safesi	AS.11		Denetleyici altyapı hizmetleri
AS.12	6.1.3	Bilgilerin sınıflandırılması	AS.12		Kalıtsal güvenlik
AS.13	6.1.3	Bilgilerin etiketlenmesi	AS.13		Ekranın bakımı
AS.14	1.3.2, 6.1.2	Bilgilerin koruması	AS.14		Kuruluş güvenliği, güvenli erişim, cihazların veya verilerin kullanılması
AS.15	6.1.2	Bilgilerin kontrolü	AS.1	2.1.4, 3.1.4, 5.2.3	Kullanıcılar ve erişim cihazları
AS.16	6.1.3	Kimlik yönetimi	AS.2	6.2.1	Ayrıcalıklı erişim hakları
AS.17	4.1.3, 5.2.4	Kimlik doğrulama bilgileri	AS.3		Bilgi erişim kısıtlamaları
AS.18	4.1.3, 4.1.3, 4.2.1	Erişim hakları	AS.4	6.2.1	Kayıp cihazların erişimi
AS.19	1.3.4, 6.1.1	Tedarikçi ilişkilerinde bilgi güvenliği	AS.5	6.1.2	Güvenli kimlik doğrulama
AS.20	6.1.1	Tedarikçi ilişkilerinde kapalı alanlarda bilgi güvenliğinin ele alınması	AS.6		Kapasite yönetimi
AS.21	6.1.1	BT (ICT) tedarik zincirinde bilgi güvenliğinin yönetimi	AS.7	5.2.3	Küçük amaçlı yazılım banyo koruma
AS.22	6.1.1	Tedarikçi hizmetlerinin izlenmesi, gözetim geçirmesi ve değerlendirilmesi	AS.8	1.5.1, 5.2.5, 5.2.6	
AS.23	6.3.3	Büyük hizmetlerinin kullanımı için bilgi güvenliği	AS.9	1.2.4, 4.1.3	Konfigürasyon yönetimi
AS.24	1.6.1, 1.6.2	Bilgi güvenliği olay yönetimi planlaması ve hazırlığı	AS.10	1.3.2	Bilgi silme
AS.25	6.6.2	Bilgi güvenliği olaylarına ilişkin değerlendirme ve karar	AS.11		Veri maskeleyme
AS.26	6.6.2	Bilgi güvenliği olaylarına müdahale	AS.12		Veri yedekleme izleme
AS.27	6.6.2	Bilgi güvenliği olaylarından öğrenme	AS.13	5.2.9	Bilgi yedekleme
AS.28		Kayıpların toplanması	AS.14		Bilgi silme testlerinin yapılabilirliği
AS.29	6.6.3	Hesapları yeniden bilgi güvenliği	AS.15	5.2.4	Yedekleme
AS.30		İş sürekliliği için BİT (ICT) hazırlığı	AS.16		İzleme faaliyetleri
AS.31	7.1.1	Yasal, düzenleyici ve sözleşmeye dayalı gereksinimlerin belirlenmesi	AS.17		Satın alma sürecinin izlenmesi
AS.32	7.1.1	Fiziki müdahaleler hakkındaki	AS.18		Ayrıcalıklı denetim programlarının kullanımı
AS.33	7.1.1	Kayıpların korunması	AS.19	5.2.5	İhtimallere dayanarak izleme yazılım kurulumu
AS.34	7.1.2	Kayıpların bildirimi (BTI) geliştirme ve korunması	AS.20	5.2.7	AG güvenliği
AS.35	7.1.2	Bilgi güvenliğine ilişkin değerlendirme ve karar	AS.21	5.2.2	AG hizmetlerinin güvenliği
AS.36	1.5.1, 5.2.6	Bilgi güvenliğine yönelik politika ve standartlara uygunluk	AS.22	5.2.7	Ağların ayarlanması
AS.37		Ölçümlerin izlenmesi	AS.23		Web sitelerinin
AS.1	6.1.1	Yönetim	AS.24	6.1.1	Ekranların korunması
AS.2	7.1.2	İzlenimlerin paylaşılması ve korunması	AS.25	6.1.1	Güvenli erişim yazılım denetimi
AS.3	7.1.3	Bilgi güvenliği farkındalığı, eğitim ve geliştirme	AS.26	1.3.3	Uygulama güvenliği gereksinimleri
AS.4		Ölçümlerin izlenmesi	AS.27		Güvenli sistem mimarisi ve mühendislik (test)
AS.5	7.1.2	İş akışının testi veya doğrulandıktan sonraki sorunluluklar	AS.28		Güvenli bulutlara
AS.6	6.1.2	Güvenli veya fiziksel erişim alanlarının	AS.29	6.1.1	Geliştirme ve kabulatı güvenli testi
AS.7	1.3.4, 3.1.4	Uyarılar, bildirimler	AS.30	6.1.8	Ölçümlerin geliştirilmesi
AS.8	6.6.1	Bilgi güvenliği olay raporlaması	AS.31	6.2.2	Geliştirme, test ve canlı ortamdan ayrılma
			AS.32	5.2.1	Doğruluklı yönetimi
			AS.33		Tanımlı bilgi
			AS.34	5.2.8	Depolama birimleri arasında bilgi transferinin izlenmesi

Şekil 3 ISO/IEC 27001:2022 Ek.A - TISAX Eşleştirme Tablosu

Evrensel bir yönetim sistemi olan ISO/IEC 27001:2022 içinde daha yuvarlak ve adapte edilebilir olarak tanımlanmış olan benzer başlıklar TISAX içinde otomotiv sektörünün geçmiş tecrübesi ve endişeleri ile daha net ve keskin olarak tanımlanmıştır.

TISAX 6 versiyonuna geçerken iş sürekliliği, kriz yönetimi ve kurum içinde kullanılan yazılım ve uygulamaya eskisinden daha büyük önem veren eklemeler yapmıştır.

9.1. SİSTEMSEL İLİŞKİLER VE BİLGİ GÜVENLİĞİ SÜREÇLERİ

Bilgi güvenliği sistemi bütünlük bir yapıdır:

- Olay yönetimi çıktıları risk değerlendirmeye geri beslenmelidir.
- Risk analizleri, düzeltici faaliyet planlarına dönüşmelidir.
- İş etki analizleri, iş sürekliliği planlarına temel oluşturmalı; RTO / RPO hedefleri bu analizlerden türetilmelidir.
- Kimlik yönetimi, tedarikçi seçim politikaları ve teknik kontroller, bu analizlerin çıktısına göre belirlenmelidir.

- Dış IT servislerinin sistem içinde kullanımının artması ile müşteri ayırımından sistem güvenliğine, hizmet seviye anlaşmalarından (SLA) hizmetin sonlanmasında bilgilerin iadesi ve güvenli imhasına kadar pek çok konu bir bütün içinde alınmalı ve bu

hizmet sağlayıcıların performansı yakından ve sürekli izlenmelidir.

- İç ağların, ağlardaki aktif hizmetlerin ve bunların dayandığı kriptografik altyapının güvenliği ve güncelliği izlenmelidir.

9.2. BİLGİ GÜVENLİĞİ YÖNETİM SİSTEMLERİNİN ÖNEMİ

- Risk temelli yaklaşım TISAX ve ISO/IEC 27001'de ortaktır.
- Kimlik doğrulama, kriptografik seçimler, dış servis tedariki gibi kararlar risk değerlendirme çıktısına bağlı olmalıdır.
- Olay yönetimi, iş sürekliliği ve denetim mekanizmaları birbirini beslemeli, süreçler arası entegrasyon olmalıdır.

9.2.1. STANDARTLAR ARASINDA ENTEGRASYON İLİŞKİSİ

TISAX – ISO/IEC 27001: Karşılıklı kontrol eşleşmeleri ile uyum çok yüksektir.

ISO/SAE 21434:

- TARA ile siber risklerin değerlendirilmesi
- Ürün yaşam döngüsü boyunca izlenebilirlik

ISO 24089:

- Yazılım güncellemelerinde süreçsel bilgi güvenliği ve izlenebilirlik

10. OTOMOTİV BİLGİ GÜVENLİĞİ: ISO/SAE 21434 VE ISO 24089 BAĞLAMINDA YORUM

10.1. ISO/SAE 21434 İLE UYUM

ISO/SAE 21434, özellikle otomotiv siber güvenliği üzerine odaklanmakta olup, araç içerisinde ve tedarik zinciri boyunca **gizlilik, bütünlük ve erişilebilirlik** ilkelerini siber risklere karşı güvence altına almayı hedefler. Bu standardın tedarikçiler için kritik gördüğü noktalar şunlardır:

- **Siber Güvenlik Risk Yönetimi:** Yan sanayi firmaları ürün yaşam döngüsünde (V-Model) güvenlik analizleri (TARA – Threat Analysis and Risk Assessment) gerçekleştirmelidir. Bildiride önerilen “risk değerlendirmesinin tüm kararların temelinde olması gerektiği” yaklaşımı, ISO/SAE 21434 ile tam uyumludur.
- **Güvenlik Önlemlerinin İzlenmesi:** Kimlik doğrulama, erişim kontrolü, dış servis seçimleri ve kriptografik algoritmalar gibi tüm kararlar risk değerlendirmesi sonuçlarına dayalı olmalıdır.
- **Olay Bildirimi ve İyileştirme Süreci:** TISAX ve ISO 27001’de olduğu gibi, ISO/SAE 21434 de siber olayların değerlendirilerek hem ürün güvenliğine hem de sürece etkisinin analiz edilmesini şart koşar. Bildirinizde

geçen “ihlal olaylarının risk değerlendirmeye yansıtılması” ifadesiyle örtüşmektedir.

10.2. ISO 24089 İLE YAZILIM GÜNCELLEMELERİ VE TEDARİKÇİ SORUMLULUĞU

ISO 24089, yazılım güncellemelerinin güvenli, izlenebilir ve sürdürülebilir bir şekilde yönetilmesini zorunlu kılar. Bu bağlamda;

- **Tedarikçi Yazılım Güncelleme Süreci:** Yazılım sağlayan yan sanayi firmaları, güncelleme paketlerinin sahte olmadığını doğrulayacak **kriptografik mekanizmaları** ve **kayıt zinciri doğrulamasını** kullanmalıdır.
- **Tersine Etki Analizi (Reverse Impact):** Yapılacak bir güncellenmenin bilgi güvenliği üzerindeki etkisi, RTO/RPO gibi iş sürekliliği hedefleri ile örtüşmeli, iş etki analizi çıktıları dikkate alınmalıdır.
- **Sistem Mimarisi Uyumluluğu:** Tedarikçilerin geliştirdiği yazılımın OTA (Over-the-Air) sistemler ve OEM servis altyapısıyla entegre olabilmesi için bilgi güvenliği politikaları ile yazılım mimarisi arasında uyum sağlanmalıdır.

11. TEDARİK ZİNCİRİ GÜVENLİĞİNDE ENTEGRE YAKLAŞIM

21434 ve 24089’un her ikisi de, özellikle **tedarikçi-zincir güvenliğini** bir bütün olarak ele alır. Sizin de belirttiğiniz gibi:

- Bilgi güvenliği süreçleri sadece kurum içinde değil, **tedarikçiler ve dış servis sağlayıcılar** için de geçerlidir.
- Olay yönetimi, düzeltici faaliyetler ve erişim kontrolleri, tüm bu standartlarda **entegre bir sistem** olarak ele alınmakta, ayrı süreçlerin çıktılarının birbirine yansıtılması beklenmektedir.
- OEM’ler artık sadece ürün kalitesi değil, bilgi güvenliği kapasitesi açısından da tedarikçilerini denetlemekte ve sürekli gelişim beklentisi içindedir.

12. BİR BİLGİ GÜVENLİĞİ YÖNETİM SİSTEMİ OLMAYAN OTOMOTİV YAN SANAYİ ŞİRKETLERİNİN KATEGORİK YETERLİLİKLERİ

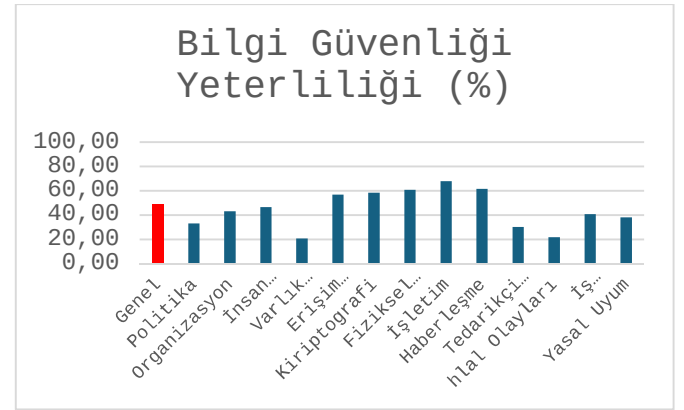
Henüz ISO/IEC 27001 veya TISAX belgelendirme/etiketleme süreçlerini tamamlamamış yan sanayi şirketlerinin bilgi güvenliği konusundaki genel ve kategorik yeterlilikleri aşağıdaki gibidir:

Genel Başarı % 48,88

Kategorik olarak:

Bilgi Güvenliği Politikaları % 33,17

Bilgi Güvenliği Organizasyonu	% 43,00
İnsan Kaynakları Yönetimi	% 46,67
Varlık Yönetimi	% 20,67
Erişim Kontrolü	% 56,83
Kriptografik Kontroller	% 58,33
Fiziksel Güvenlik	% 60,83
İşletim Güvenliği	% 68,00
Haberleşme Güvenliği	% 61,50
Tedarikçi Bilgi Güvenliği	% 30,33
İhlal Olayları Yönetimi	% 21,83
İş Sürekliliği	% 40,83
Yasal Uyum	% 38,17



Şekil 4 Belgelendirme Öncesi BGYS Yeterliliği

Bu araştırma bilgi güvenliği konusunda hiç çalışma yapmamış firmaların yanında çalışmalara başlamış ama henüz belgelendirme / etiket alma aşamasını geçmemiş yan sanayi şirketlerini içermektedir. Bursa, İstanbul, Kocaeli, Eskişehir ve Ankara’da yer alan firmalar üzerinde yapılan değerlendirmelerden aritmetik ortalama ile hesaplanmıştır.

Belge etiket aşamasındaki firmaların her başlıkta skoru %5 kadar yükselttiği gözlenmiştir. Bu da henüz bilgi güvenliği yönetim sistemleri üzerinde çalışmaya başlamamış olan firmaların daha da büyük bir yük ve çabayla karşı karşıya olduğunu göstermektedir.

13. TISAX VE DIŞ IT SERVİSLERİ – BÜTÜNLEŞİK DEĞERLENDİRME

TISAX (Trusted Information Security Assessment Exchange), otomotiv ekosisteminde bilgi güvenliği için OEM ve tedarikçiler arasında ortak bir güven çerçevesi istemektedir. Dış IT servisleri konusu, yalnızca 1.2.4 maddesi ile sınırlı değildir; 1.3.3, 5.3.3 ve 5.3.4 maddeleri de doğrudan bağlantılıdır. Ayrıca ISO/IEC 27017 ve 27018 standartları bulut ve kişisel veri

koruması açısından tamamlayıcı rol oynar. Bu metinde, ilgili maddeler ve yerli yazılım/bulut sağlayıcılar üzerindeki olası etkiler bir arada sunulmaktadır.

13.1 TISAX BEKLENTİLERİ

1.2.4 – Dış IT Servisleri

- Sözleşmelere bilgi güvenliği, gizlilik ve uyum yükümlülükleri eklenmeli.
- ISO/IEC 27001, TISAX sertifikaları ve etiketi talep edilmeli.
- Veri konumu, sınır ötesi veri transferi ve yasal uygunluk belgelenmeli.

1.3.3 – Kritik Tedarikçilerin Yönetimi

- Kritik servisler için risk bazlı değerlendirme yapılmalı.
- Kritik sağlayıcılar düzenli olarak denetlenmeli.
- SLA/OLA'lar güvenlik kriterlerini kapsamalı.

5.3.3 – Bulut Servislerinin Kullanımı

- Bulut sağlayıcılardan ISO/IEC 27017 ve 27018 uyumu beklenmeli.
- Multi-tenant ortamlarda veri izolasyonu, şifreleme ve erişim kontrolü zorunlu.
- Microsoft, AWS, Google, SAP gibi sağlayıcılar TISAX etiketi olarak dış IT servis sağlayıcı olma konusunda öne geçiyor.

5.3.4 – Dış IT Servislerinin İzlenmesi

- Sağlayıcılar düzenli log, denetim ve güvenlik değerlendirmeleri ile izlenmelidir.
- SLA takibi güvenlik ihlallerini de kapsamalıdır.
- İhlallerde müşteri hızlı bilgilendirilmelidir.

13.2. YERLİ YAZILIM VE BULUT SAĞLAYICILARA OLASI ETKİLER

- Yerli sağlayıcıların yalnızca ISO/IEC 27001 değil, aynı zamanda ISO/IEC 27017 ve 27018'e uyumlu olmaları gerekecektir.
- TISAX etiketi, otomotiv sektörüne giriş bileti haline gelmekte; bu sertifikasyona yatırım yapmayan sağlayıcılar rekabet dezavantajı yaşayabilir.
- OEM ve Tier-1 şirketler, Türkiye'deki sağlayıcıları kritik tedarikçi olarak işaretleyebilir ve sıkı denetimler uygulayabilir.
- Türkiye içindeki veri merkezleri KVKK açısından avantajlı olsa da, AB merkezli OEM'ler AB içi veri lokasyonu talep edebilir.
- ISO/IEC 27017/27018 + TISAX + ISO/IEC 27001 sertifikasyon paketleri ciddi maliyet yaratır, ancak küresel pazara erişim için zorunlu hale gelir.
- Microsoft, AWS, Google, SAP gibi küresel sağlayıcıların TISAX uyumluluğu, OEM'ler için güvenli liman oluşturmaktadır.

14. AB CYBER RESİLİENCE ACT VE TEDARİKÇİLERE ETKİSİ

Avrupa Birliği tarafından kabul edilen Cyber Resilience Act (CRA), dijital unsurlar içeren tüm ürünler için minimum siber güvenlik gereklilikleri getirmektedir. CRA, yalnızca nihai ürünleri değil, yazılım, donanım ve gömülü sistemleri de kapsamakta; bu nedenle otomotiv ekosisteminde yan sanayi ve IT tedarikçileri üzerinde doğrudan etki yaratmaktadır.

CRA'nın Temel Gereklilikleri:

- Güvenli tasarım: Yazılım ve donanım bileşenleri "secure by design" yaklaşımı ile geliştirilmelidir.
- Güncelleme yükümlülüğü: Ürünler için ömür boyu güvenlik güncellemeleri ve güvenlik açıklarının hızlı şekilde kapatılması zorunlu hale gelmektedir.
- Zafiyet yönetimi: Üreticiler, keşfedilen güvenlik açıklarını Avrupa Siber Güvenlik Ajansı (ENISA) üzerinden raporlamakla yükümlüdür.
- Tedarikçi zinciri güvenliği: OEM'ler, CRA uyumu için yalnızca kendilerinde değil, tüm tedarik zincirinde uyum talep edecektir.

Otomotiv Yan Sanayi ve IT Tedarikçilerine Ek Yükümlülükler:

- Sertifikasyon genişlemesi: ISO/IEC 27001 ve TISAX gibi mevcut sertifikasyonlara ek olarak, CRA'nın talep ettiği AB odaklı uyum belgeleri gündeme gelecektir.
- Güncelleme desteği: Yazılım ve kontrol ünitesi (ECU) geliştiren tedarikçiler, ürünün yaşam döngüsü boyunca güvenlik yamalarını sağlamak zorundadır.
- Zafiyet bildirimi: Tedarikçiler, güvenlik açıklarını OEM'e ve yetkili AB otoritelerine raporlamakla yükümlü olacaktır.
- Sözleşme yükümlülükleri: OEM'ler, tedarikçilerin CRA yükümlülüklerine uyumunu SLA/OLA hükümlerine açıkça koyacak, uyumsuzluklar iş birliğini doğrudan etkileyecektir.

Stratejik Etki:

CRA ile birlikte, bilgi güvenliği yalnızca gönüllü standart uyumundan çıkıp yasal zorunluluk haline gelmektedir. Bu durum, özellikle küçük ve orta ölçekli tedarikçilerin maliyetlerini artıracak, ancak AB pazarında kalabilmek için bu yükümlülüklerin yerine getirilmesi zorunlu olacaktır.

15. STRATEJİK ÖNERİLER

- Kısa vadede ISO/IEC 27017 ve 27018 sertifikasyonlarının alınması, orta vadede TISAX etiketi hedeflenmeli.
- Kritik tedarikçi konumundaki yerli sağlayıcılar, SLA'lara güvenlik ve uyum maddeleri eklemeli.
- OEM ve Tier-1 beklentileri dikkate alınarak, veri konumu ve regülasyon uyumluluğu şeffaf şekilde belgelenmeli.
- Uluslararası rekabette geri kalmamak için yalnızca KVKK değil, küresel standartlarla uyum sağlanmalı.

TISAX Maddesi	ISO/IEC 27001:2022 Annex A	ISO/IEC 27017	ISO/IEC 27018
1.2.4 Dış IT Servisleri	A.5.23 A.8.9	CLD 6.3.1 (Bulut Hizmeti Müşterisi ile İlişki)	A.11 (Kişisel Veri Bilgi Güvenliği)
1.3.3 Dış IT Servislerinde İşlenen Veriler	A.5.23 A.8.2	14.1.1 (Bilgi Güvenliği Gereksinimlerinin Analizi ve Tanımlanması)	11.2 (Denetim ve sözleşme uyumu)
5.3.3 Dış IT Servislerinde Yer Alan Verinin İadesi	A.5.23	CLD8.1.5 (Bulut Hizmeti Müşterisinin Varlıklarının Kaldırılması)	A.10.3 (Kişisel Verilerin İadesi, Aktarımı ve Yok Edilmesi)
5.3.4 Dış IT Servislerinde Veri Koruması	A.8.9, A.8.12	CLD 9.5.1 (Sanal Bilişim Ortamında Ayrım 9.5.2 (Sanal Makine Sıkılaştırması)	12 (İşletim Güvenliği) 13 (Haberleşme Güvenliği)

Şekil 5 TISAX – ISO/IEC 27001 – ISO/IEC 27017/27018 Eşleştirmesi

16. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bütün bu şartlar ve gelişmeler değerlendirildiğinde otomotiv yan sanayinin uzun dönemde rekabetçi olabilmesi için bütüncül bir yaklaşımla sektörler ötesi bir stratejinin izlenmesi gereklidir.

Bu adımlar kısaca şu şekilde özetlenebilir:

1. Müşteriler tarafından resmen istenmesini beklemeden şirketler bilgi güvenliği yönetim sistemlerini hayata geçirmeye başlamalıdır. Sistemlerin kurulması zaman almaktadır. Kültürün de değişimi söz konusu olduğu için bu değişime gerekli zaman tanınmalıdır.
2. Özellikle fiziki güvenlik ve siber güvenlik anlamında yatırım yapılması gerekeceği için bütçelemelerde bu yatırımlar da değerlendirilmelidir.
3. Dosya, kimlik ve erişim yönetimi ile loglama ve yedekleme gibi siber güvenlik tedbirleri hızla geliştirilmelidir.
4. Proje yönetim ve değişiklik süreçlerinin ağır gereklerinde başarımın yüksek olması katma değeri yüksek projelerin alınması ve yürütülmesine katkı sağlayacağı için mevcut pratiklerin TISAX iyi uygulamaları ile güçlendirilmesi gerekmektedir.
5. Bilgi güvenliği, bilgi işlemin bir alt faaliyeti veya kolu olarak görülmemeli, buna uygun organizasyon oluşturulmalıdır.
6. İş sürekliliği başarımının geliştirilmesi için tüm firmayı kapsayan çalışmalar, planlama faaliyetleri ve tatbikatlar ile yüksek başarım elde edilmelidir.
7. Tedarikçilerin tedarikçilerine de bilgi güvenliği yükümlülükleri geleceği için bir alt halkayı da bu konuda

geliştirecek bir strateji gereklidir. Bu noktaya kadar yazdığımız öneriler bu halka tarafından da uygulamaya alınmalıdır.

8. Otomotiv sektörüne hizmet veren IT tedarikçileri de bilgi güvenliği çerçevelerine, özellikle de TISAX gereklerine, adım adım uyum sağlamalıdır. Yazılım geliştiriciler, bulut hizmet sağlayıcıları, SOC ve benzeri hizmetleri veren veya IT görevlerini dış kaynaklı olarak yürüten hizmet sağlayıcıların tamamı bu kapsamda değerlendirilmelidir. Çok sayıda müşteriye hizmet veren IT tedarikçilerinin TISAX etiketi alması bile düşünülmelidir.

9. Tüm bu çalışmaların getireceği olağanüstü yükün hafifletilebilmesi için T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı başta olmak üzere devlet kurumlarının yatırım, danışmanlık ve belgelendirme destekleri başlatması yerinde olacaktır.

REFERANSLAR

TISAX - optimization of IT risk management in the Automotive Industry, Tomasz Królikowski, Agnieszka Ubowska, 25th International Conference on Knowledge-Based and Intelligent Information & Engineering

<https://www.reuters.com/business/autos-transportation/vw-says-data-breach-vendor-impacted-33-million-people-north-america-2021-06-11/>

<https://www.theguardian.com/business/2025/sep/16/jaguar-land-rover-production-shutdown-cyber-attack>

<https://www.computerweekly.com/feature/Toyota-car-plant-outage-shows-database-capacity-planning-is-vital>

TISAX vs. ISO 27001: Similarities, Differences, Mappings & Best Practices — **StrikeGraph Blog**, Şubat 2025.

TS ISO/IEC 27001:2022 Bilgi güvenliği, siber güvenlik ve kişisel gizliliğin korunması - Bilgi güvenliği yönetim sistemleri - Gereklilikler; TSE

TS EN ISO/IEC 27017:2021 Bilgi teknolojisi - Güvenlik teknikleri – Bulut hizmetlerinde ISO/IEC 27002'ye dayalı bilgi güvenliği kontrolleri için uygulama ilkesi, TSE

TS EN ISO/IEC 7018:2020 Bilgi teknolojisi - Güvenlik teknikleri - PII (Kişi tanımlama bilgisi) işleyen açık bulut ağlarda kişi tanımlama bilgisinin korunması için uygulama prensipleri, TSE

ISO/SAE 21434:2021 Road Vehicles- Cybersecurity Engineering, ISO/SAE

ISO 24089:2023 Road vehicles — Software update engineering, ISO

ISA 6 EN 6.0.3, <https://enx.com/isa6-en.xlsx>

https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:864f472b-34e9-11ed-9c68-01aa75ed71a1.0001.02/DOC_1&format=PDF

https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:864f472b-34e9-11ed-9c68-01aa75ed71a1.0001.02/DOC_2&format=PDF

WAC: AŞINMA AYARLI DEBRİYAJ BASKISI

Zeynep Duygu ÖZEL ¹, Günnur KOCAMAN ²

1 MA-PA Makina Parçaları Endüstrisi A.Ş. , Ar-Ge Departmanı, Çayırova/Kocaeli

2 MA-PA Makina Parçaları Endüstrisi A.Ş. , Ar-Ge Departmanı, Çayırova/Kocaeli

ÖZET

Bu çalışmada, aşınma ayarlı debriyaj (WAC) teknolojisinin geliştirilmesine yönelik detaylı bir araştırma ve analiz gerçekleştirilmiştir. Debriyaj sistemlerinde aşınma, zamanla pedal kuvvetinin artması ve baskı yükünün azalması gibi problemleri beraberinde getirmekte, bu da sürüş konforunu ve mekanizmanın ömrünü ciddi şekilde etkilemektedir. WAC teknolojisi, balataların aşınma seviyesine bağlı kalmadan debriyaj baskısının pedal kuvveti ve baskı yükü gibi temel teknik özelliklerini sabit tutarak bu sorunları çözmek üzere tasarlanmıştır. Bu çalışmada, söz konusu teknolojinin literatürdeki mevcut çözümlerle karşılaştırılması yapılmış ve üstünlükleri vurgulanmıştır. Proje kapsamında literatür taramaları, rakip ürün analizleri, mukavemet hesaplamaları ve prototipleme süreçleri detaylı bir şekilde ele alınmıştır. Tasarım, tamamen özgün bir mühendislik yaklaşımıyla geliştirilmiş ve sektörün gereksinimlerini karşılamanın ötesine geçmiştir. Elde edilen sonuçlar, teknolojinin yenilikçi yapısını ve sürdürülebilir rekabet avantajlarını gözler önüne sermektedir. Ayrıca, Almanya Frankfurt Automechanica fuarında kazanılan inovasyon ödülü, ürünün uluslararası düzeyde tanınırlığını artırmıştır. Bu inovatif yaklaşım, sürüş konforunu optimize etmek ve araç performansını iyileştirmek amacıyla hem teorik hem de pratik boyutlarda önemli katkılar sağlamıştır.

ANAHTAR KELİMELER

Aşınma Ayarlı Debriyaj, WAC Teknolojisi, Mekanizma Tasarımı, Pedal Yüğü, Baskı Yüğü

GİRİŞ VE KURAMSAL ÇERÇEVE

Aşınma ayarlı debriyaj (WAC) teknolojisi, özellikle araç kullanıcıları için sürüş konforunu artırmak ve debriyaj sistemlerinin ömrünü uzatmak amacıyla geliştirilmiş yenilikçi bir mekanizmadır. Günümüzde, özellikle manuel şanzımanlı araçlarda kullanılan standart debriyaj sistemleri, kullanım ömrü boyunca sürtünme yüzeylerinde meydana gelen aşınma nedeniyle performans kaybı yaşamaktadır. Bu performans kaybı, sürücünün hissettiği pedal kuvvetinin artmasına ve debriyajın kavrama yeteneğinin azalmasına yol açmaktadır. İlk olarak 1995 yılında tanıtılan kendinden ayarlı debriyaj teknolojisi, bu problemleri çözmek için önemli bir adım olmuştur. Ancak, zamanla farklı kullanım koşulları ve araç gereksinimleri, mevcut teknolojinin eksikliklerini ortaya çıkarmış ve sektörde yeni çözümlere olan ihtiyacı artırmıştır. Firmamız tarafından geliştirilen WAC teknolojisi, geleneksel çözümlerden tamamen bağımsız olarak tasarlanmıştır ve optimize edilmiş diyafram yay mekanizması ile aşınma telafi performansını önemli ölçüde iyileştirmektedir. Çalışmanın kuramsal çerçevesinde, balata aşınmasının mekanik ve termal etkileri üzerine yapılan analizler ile literatürdeki mevcut teknolojilerin avantaj ve dezavantajları ayrıntılı bir şekilde değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, WAC teknolojisinin, sürüş konforunu artırarak ve maliyet etkin bir çözüm sunarak sektördeki diğer yaklaşımlardan üstün olduğunu kanıtlamaktadır.

YÖNTEM

Bu çalışmada kullanılan yöntem, mühendislik tasarımı ve performans analizlerini kapsamlı bir şekilde bir araya getiren bir yaklaşıma dayanmaktadır. İlk aşamada, literatürde mevcut olan tüm aşınma ayarlı debriyaj teknolojileri detaylı olarak incelenmiş, patentler ve ticari ürünler benchmarking analizleri ile karşılaştırılmıştır. Daha sonra, elde edilen bulgular ışığında, WAC mekanizması için özgün bir tasarım süreci başlatılmıştır. Tasarım süreci, mekanizmanın temel işlevlerini optimize etmek için kullanılan sonlu elemanlar yöntemiyle desteklenmiştir. Bu kapsamda, diyafram yay profili, temas noktaları ve basınç dağılımı gibi kritik parametreler üzerinde yapılan analizler, mekanizmanın uzun ömürlü ve kullanıcı dostu olmasını sağlamıştır. Ayrıca, prototip geliştirme sürecinde, mekanizmanın mekanik dayanıklılığı ve aşınma toleransı laboratuvar ortamında gerçekleştirilen çeşitli testlerle değerlendirilmiştir.

Mekanizmanın çalışma prensibi, motorun dönme hareketi nedeniyle oluşturduğu kinetik enerjinin, mekanizmayı tetiklemesi ile balatalar aşındıkça kompanzasyon ve sensör plakalarını dönmeye zorlamasına dayanmaktadır. Motorun krank milinden volana, volandan da debriyaj baskısına iletilen bu enerji plakaları üzerlerindeki diş profilleri vasıtasıyla hareket ettirerek aşınma kompanzasyon plakasına ve sensör plakasına iletilir. Balata kalınlığı azalırsa, baskı plakası debriyaj diskine doğru hareket eder. Bu hareket, aşınma sensörü temas yüzeyi ve hem aşınma kompanzasyon plakası hem de aşınma sensör plakası arasında, balata kalınlığındaki toplam azalmaya eşit bir boşluk oluşturur.

Baskı testi, disk torku ve dinamometre testleri gibi deneysel çalışmalardan elde edilen veriler, tasarımın teorik hesaplamalarla uyumlu olduğunu ortaya koymuştur. Araç üstü testlerle tamamlanan süreç, tasarımın gerçek dünya koşullarında da beklenen performansı sağladığını göstermiştir. Sonuç olarak, bu yöntemin yenilikçi yaklaşımı, hem teknolojik hem de ticari olarak önemli faydalar sağlamaktadır.

BULGULAR

Araştırma kapsamında geliştirilen WAC mekanizması, kullanıcı konforu ve debriyaj ömrü açısından mevcut çözümlerden üstün performans göstermiştir. Laboratuvar testleri, mekanizmanın pedal kuvvetini sabit tuttuğunu ve baskı yükünün aşınmaya rağmen korunduğunu ortaya koymuştur. Diyafram yay tasarımında yapılan optimizasyonlar, mekanizmanın dayanıklılığını artırmış ve mekanik deformasyon riskini minimuma indirmiştir. Ayrıca, araç üstü testlerde, WAC mekanizmasının uzun süreli kullanımda bile istikrarlı bir performans sergilediği gözlemlenmiştir. Mekanizmanın tork iletim kapasitesi, daha küçük çaplı bir tasarımda dahi yüksek verimlilik sağlamış ve bu da aracın genel yakıt ekonomisine olumlu katkıda bulunmuştur. Bu bulgular, WAC teknolojisinin sadece teknik açıdan değil, aynı zamanda ekonomik ve çevresel faydalar açısından da sektörde yeni bir standart oluşturabileceğini göstermektedir.

SONUÇ

WAC teknolojisi, aşınma ayarlı mekanizmalar arasında yenilikçi bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. Bu çalışma, mevcut tasarımlara kıyasla daha yüksek performans ve kullanım konforu sağlayan bir mekanizma geliştirilmesini hedeflemiştir. Literatür taramaları, tasarım optimizasyonları ve deneysel doğrulamalar, mekanizmanın üstün özelliklerini kanıtlamıştır. Özellikle, Almanya Frankfurt Automechanica fuarında kazanılan inovasyon ödülü, bu çalışmanın uluslararası düzeyde takdir edildiğini göstermektedir. Patent ile koruma altına alınan WAC teknolojisi, ticari olarak büyük bir potansiyele sahiptir ve sektördeki liderlik hedeflerini desteklemektedir. Bu sonuçlar, yalnızca teknolojik ilerlemeye değil, aynı zamanda sürdürülebilir ve rekabetçi bir pazara da katkıda bulunmaktadır.

MODEL TABANLI SİSTEM MÜHENDİSLİĞİ YAKLAŞIMIYLA OTOMOTİV GÜVENLİK STANDARTLARININ ENTEGRASYONU

Cenk E. Tezel

Günizi Kurumsal Eğitim Müh. Tur. Tic. Ltd. Şti. Üçevler Mh. Ersan Sk. No:8 B Blok Nilüfer
Bursa TÜRKİYE

Tel: 533 332 48 01 E-Posta cenktezel@tutulemma.com

ÖZET

Otomotiv sektöründe yazılım miktarının hızla artması, güvenlik, siber güvenlik, bilgi güvenliği ve yazılım güncellemelerinin birbirinden bağımsız ele alınamayacağını göstermektedir. Önümüzdeki on yıl içinde araçlarda kullanılan yazılım satır sayısının bir milyar satırı aşacağı öngörülmektedir. Bu gelişme, ISO 26262 (fonksiyonel güvenlik), ISO/SAE 21434 (siber güvenlik), ISO/IEC 24089 (yazılım güncellemeleri) ve ISO/IEC 27001 (bilgi güvenliği yönetim sistemi) standartlarının bütünleşik bir yaklaşımla uygulanmasını zorunlu hale getirmektedir.

Bu çalışmada, ISO/IEC/IEEE 15288 yaşam döngüsü çerçevesi esas alınarak söz konusu standartların model tabanlı sistem mühendisliği (MBSE) yaklaşımıyla nasıl entegre edilebileceği incelenmiştir. Sistem mimarisi, gereksinim izlenebilirliği, varyant yönetimi, fonksiyonel testler (HIL, SIL, VIL) ve canlı testler MBSE kapsamında ele alınmış, entegrasyon matrisi ile süreçler arası ilişkiler gösterilmiştir. Ayrıca, dijital ikiz yaklaşımının güvenli güncelleme ve operasyonel izleme süreçlerine katkısı vurgulanmıştır.

Sonuç olarak MBSE, artan yazılım karmaşıklığını yönetmede yalnızca teknik değil, stratejik bir çözüm sunmaktadır. Bu entegrasyon, OEM'lerin güvenli, güncellenebilir ve sürdürülebilir otomotiv sistemleri geliştirmesine olanak sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler:

Model Tabanlı Sistem Mühendisliği (MBSE),
Otomotiv Bilgi Güvenliği, Fonksiyonel Güvenlik

(ISO 26262), Siber Güvenlik (ISO/SAE 21434), Yazılım Güncellemeleri (ISO/IEC 24089), Bilgi Güvenliği Yönetim Sistemi (ISO/IEC 27001), Sistem Yaşam Döngüsü (ISO/IEC/IEEE 15288), Dijital İkiz, HIL, SIL, VIL Testleri, OTA (Over-the-Air) Güncellemeler, Sistem Mimarisi, Entegrasyon Matrisi

1. GİRİŞ

Bağlantılı ve otonom araç teknolojilerinin yükselişi, otomotiv sektörünü yalnızca işlevsel güvenlik değil, aynı zamanda siber güvenlik, güncellenebilirlik ve bilgi güvenliği alanlarında da standartlara dayalı çözümler geliştirmeye zorlamaktadır.

Karayolu araçlarında kullanılan kod miktarı sürekli olarak artış göstermektedir. İçten yanmalı motorlu araçlarda görece daha düşük olan kod miktarı hibrit ve elektrikli araçlarda çok daha büyük miktarlara çıkmaktadır. Kod satırı olarak incelendiğinde günümüzde ortalama 10 – 50 – 100 milyon satır olarak kod miktarının 2035 yılında 30 – 100 – 150 milyon satıra yükselmesi ön görülmektedir.

2035 ötesi için ise milyar satırlar ifade edilmektedir.

Büyümenin Başlıca Nedenleri

- ADAS ve otonom sürüş sistemlerinin yaygınlaşması

- SDV (Software Defined Vehicle) mimarisine geçiş

- OTA (Over-the-Air) güncellemelerin standartlaşması

- Bulut bağlantısı, V2X iletişimi, mobil uygulamalar

- ISO/SAE 21434, ISO 24089 gibi standartların zorunlu hale gelmesi

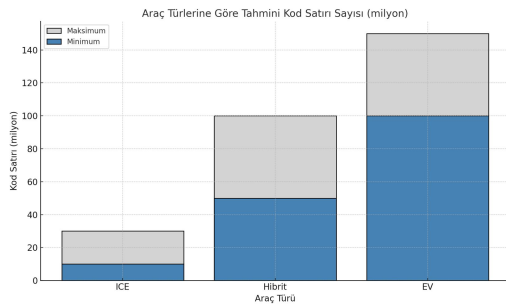
Sonuç ve Etkiler

- Yazılım miktarındaki artış, güvenlik yüzeyini genişletir.

- Siber güvenlik ve yazılım güncelleme yönetimi kritik hale gelir.

- Kod güvenliği, yaşam döngüsü yönetimi, test ve sertifikasyon süreçleri daha karmaşık hale gelir.

- OEM'ler için teknoloji ortaklarıyla (Nvidia, Bosch, Qualcomm, TI vb.) daha entegre bir çalışma gerektirir.



Şekil 1 Araç Türlerine Göre Tahmini Kod Satın Sayısı (milyon)

Bu durum da birbirleriyle etkileşen ve tüm sistem olarak aracın doğru olarak çalışması ve görevini yerine getirmesini sağlamaya çalışan tüm bu yazılımların planlama, geliştirme, test, güncelleme dahil tüm yaşam döngüsünün sistemli olarak ele alınmasını zorunlu hale getirmektedir.

2. TANIMLAR VE KISALTMALAR

Bu bölümde bildiride geçen başlıca standartlar, kavramlar ve kısaltmalar açıklanmaktadır.

MBSE: Model Tabanlı Sistem Mühendisliği – sistemlerin dijital modeller aracılığıyla geliştirilmesi, izlenmesi ve doğrulanması yaklaşımı.

ISO/IEC/IEEE 15288: Sistem yaşam döngüsü süreçlerini tanımlayan uluslararası standart.

ISO 26262: Otomotiv fonksiyonel güvenlik standardı.

ISO/SAE 21434: Otomotiv siber güvenlik standardı.

ISO/IEC 24089: Araçlarda yazılım güncellemelerinin yönetimi için uluslararası standart.

ISO/IEC 27001: Bilgi güvenliği yönetim sistemi standardı.

OTA (Over-the-Air): Araç yazılımlarının kablosuz olarak güncellenmesini sağlayan yöntem.

HIL (Hardware-in-the-Loop): Gerçek donanımların simülasyon ortamında test edilmesini sağlayan yöntem.

SIL (Software-in-the-Loop): Yazılım bileşenlerinin sanal ortamda test edilmesini sağlayan yöntem.

VIL (Vehicle-in-the-Loop): Gerçek araç ile sanal trafik senaryolarının birlikte test edilmesini sağlayan yöntem.

Dijital İkiz: Gerçek sistemin sanal bir kopyası olup test, doğrulama ve güncelleme süreçlerinde kullanılır.

2.1. İLGİLİ STANDARTLAR VE TEMEL ROLLERİ

- ISO/SAE 21434: otomotiv siber güvenliği
- ISO 26262: fonksiyonel güvenlik
- ISO/IEC 24089: yazılım güncellemeleri
- ISO/IEC 27001: bilgi güvenliği

ISO 26262 12 standarttan oluşmaktadır. Bunların 2'si son revizyon ile 2018'de eklenmiştir.

ISO 26262:2018 – Road Vehicles — Functional Safety

1. Part 1: Vocabulary

Standardın genelinde kullanılan terimlerin ve tanımların açıklaması.

2. Part 2: Management of Functional Safety

Fonksiyonel güvenliğin yönetimi; organizasyonel yapı, sorumluluklar ve süreç yönetimi.

3. Part 3: Concept Phase

- Konsept aşaması; tehlike analizi, risk değerlendirmesi (HARA), güvenlik hedefleri.
4. Part 4: Product Development at the System Level
- Sistem düzeyinde ürün geliştirme; güvenlik gereksinimleri, sistem mimarisi.
5. Part 5: Product Development at the Hardware Level
- Donanım geliştirme; hata toleransı, arıza oranı hesapları, güvenlik analizleri.
6. Part 6: Product Development at the Software Level
- Yazılım geliştirme; güvenlik gereksinimleri, yazılım mimarisi, kodlama ve test.
7. Part 7: Production, Operation, Service and Decommissioning
- Üretimden kullanıma, bakım ve servisten kullanım ömrü sonuna kadar güvenlik gereklilikleri.
8. Part 8: Supporting Processes
- Konfigürasyon yönetimi, değişiklik yönetimi, doğrulama, kütüphaneler ve araçların güvenliği.
9. Part 9: Automotive Safety Integrity Level (ASIL)-oriented and Safety-oriented Analyses
- ASIL tayini, güvenlik analizleri (FTA, FMEA, FMEDA).
10. Part 10: Guideline on ISO 26262
- Standardın uygulanmasına yönelik rehberlik ve yorumlayıcı açıklamalar.
11. Part 11: Guidelines on Application of ISO 26262 to Semiconductors

Yarı iletkenler (mikrodenetleyiciler, ASIC'ler vb.) için özel uygulama rehberi.

12. Part 12: Adaptation of ISO 26262 for Motorcycles

Motosikletlere uyarlama; özel riskler, güvenlik hedefleri ve uygulama yöntemleri.

3. ENTEGRASYON STRATEJİSİ

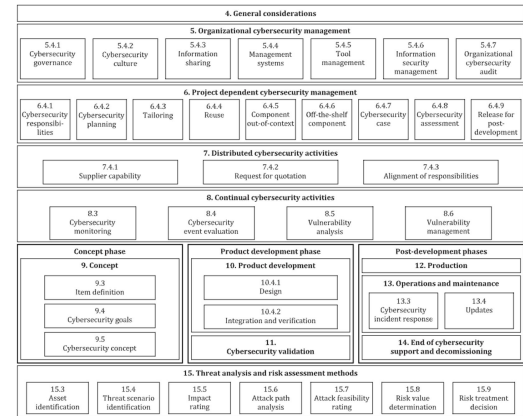
Her bir standardın ISO 15288'deki yaşam döngüsü süreç gruplarına nasıl eşlendiği gösterilmiştir.

Bunun yanında tüm bu standartlar zaten bir arada çalışmak için tasarlanmış ve birbirlerine metin içinde ilişkilendirilmiştir.

ISO 24089 içinde normatif referans olarak; ISO 26262-6, ISO 26262-8 ve ISO/SAE 21434 verilmektedir.

Aynı şekilde ISO/SAE 21434'ün normatif referansı da ISO 26262-3'dür.

Yine aynı standardın Organizasyonel Siber Güvenlik Yönetimi bölümü (Madde 5) ISO/IEC 27001'e uygun bir yapılanmayı ön görmektedir.



Şekil 2 ISO/SAE 21434 Organizasyonu

Bu noktada bir olası yanlış anlamamanın da önüne geçmekte fayda var: ISO 24089 sadece uzaktan (OTA, Over The Air) güncellemeleri değil tüm yazılım güncellemelerinin güvenliğini ilgilendiren bir standarttır. Madde 7.3.4'de kablolu (USB, Flash Drive, vb.), kablosuz (GSM, Wi-Fi) veya donanım değişikliği ile

yapılan tüm yazılım güncellemeleri kapsama dahil edilmektedir.

Otonom Araç için Yazılım Güncelleme Senaryosu

Bir Otonom Araç İçin Yazılım Güncelleme Senaryosu

Şekil 3 Otonom Araç İçin Yazılım Güncelleme Senaryosu

4. SİSTEM MİMARİSİ VE GELİŞTİRME SÜRECİNDEKİ ROLÜ

Sistem mimarisi, yalnızca bir teknik tasarım çıktısı değil, aynı zamanda bütün geliştirme sürecinin omurgasını oluşturan kritik bir entegrasyon noktasıdır. Otomotiv sektöründe güvenlik, siber güvenlik, güncellenebilirlik ve bilgi güvenliği gereksinimlerinin artması, sistem mimarisinin bu alanları birlikte ele alacak şekilde yeniden tanımlanmasını zorunlu kılmaktadır. ISO/IEC/IEEE 15288 yaşam döngüsü süreçleri dikkate alındığında, sistem mimarisi; kavramsal tasarımdan servisten çekmeye kadar tüm aşamaların sürekliliğini güvence altına alır.



Şekil 4 ISO/IEC/IEEE 15288 Sistem Yaşam Döngüsü Süreçleri

Modern araçlarda donanım, yazılım, haberleşme altyapısı ve bulut tabanlı servisler arasında karmaşık ilişkiler bulunmaktadır. Bu nedenle mimari, katmanlı bir yapı üzerinden ele alınmalı; donanım katmanı, işletim sistemi ve middleware, uygulama yazılımı ve kullanıcı etkileşim katmanı net biçimde ayrıştırılmalıdır. Bu katmanlar arasındaki etkileşimlerin modellenmesi, hem fonksiyonel güvenlik hem de siber güvenlik açısından kritik rol oynar.

Grady Booch'un da dediği gibi "Her sistem bir mimariye sahiptir. Bilinçli olarak veya kazayla". Bu noktada önemli olan mimarinin ihtiyaç analizlerini, kısıtları, ilişkileri doğru değerlendirilerek oluşturulmasıdır.

Örneğin, ISO 26262 kapsamındaki hata toleransı mekanizmaları, ISO/SAE 21434'te öngörülen tehdit modelleri ile birlikte mimari seviyede değerlendirildiğinde, çok daha bütünsel bir risk

yönetimi elde edilebilir.

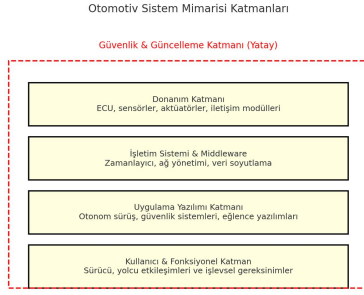


Şekil 5 MBSE Süreci - Otomotiv Güvenlik Entegrasyonu

Ayrıca sistem mimarisi, gereksinimlerin izlenebilirliği açısından da merkezi bir rol

üstlenmektedir. Bir güvenlik gereksinimi veya güncelleme politikası, mimari modelde ilgili bileşenle ilişkilendirildiğinde, değişikliklerin etkisi kolaylıkla takip edilebilir. Varyantların yönetimi de bu noktada önem kazanır; farklı araç modellerinde aynı mimarinin türevlerinin kullanımı, konfigürasyon tabanlı modelleme sayesinde mümkün olur. Bu sayede hem fonksiyonel güvenlik hedefleri hem de siber güvenlik önlemleri varyantlar arasında tutarlı biçimde korunur.

Yaşam Döngüsü Aşamaları	ISO/SAE 21434	ISO 26262	ISO/IEC 24089	ISO/IEC 27001
Kavram & Planlama	TARA analizi	HARA, ASIL tayini	Güncelleme gereksinimi	Varlık ve risk değerlendirmesi
Sistem Tanımı	Güvenli mimari	Sistem mimarisi ve arayüzleri	OTA uyumluluğu	Erişim kontrolleri
Tasarım & Geliştirme	Kriptografi, kimlik doğrulama	Güvenlik mekanizmaları	Versiyon yönetimi	Değişiklik yönetimi
Entegrasyon & Test	Penetrasyon testleri	Fonksiyonel testler	Güncelleme doğrulama	Test verisi güvenliği
Kullanım & Operasyon	Olay izleme, güncelleme sonrası izleme	Operasyonel güvenlik	OTA uygulama ve takibi	Loglama, izleme
Bakım & Güncelleme	Sürekli tehdit yönetimi	Güvenli bakım	Rollback, güncelleme döngüsü	İzleme ve gözden geçirme
Servisten Çekme	Veri silme, güvenli kapatma	Fonksiyonel sonlandırma	Güncellenmenin durdurulması	Varlık emekliliği



Şekil 6 Otomotiv Sistem Mimarisi Katmanları

Son olarak, mimari aşamada yapılan çalışmalar yalnızca geliştirme sürecini değil, fonksiyonel ve canlı testlerin etkinliğini de doğrudan etkiler. İyi tanımlanmış bir mimari, HIL, SIL ve VIL test senaryolarının daha erken aşamalarda hazırlanmasına olanak sağlar. Böylelikle MBSE yaklaşımı, sistem mimarisini geliştirme sürecinin merkezine yerleştirerek, standartların entegrasyonunu ve izlenebilirliği en üst düzeye çıkarmaktadır.

5. MODEL TABANLI SİSTEM MÜHENDİSLİĞİ (MBSE)

MBSE, mimariyi yalnızca görselleştirmekle kalmaz; aynı zamanda doğrulama, test ve güncelleme döngülerini de tek bir dijital ikiz üzerinden yönetir.

5.1 MBSE ADIMLARI VE STANDARTLARLA EŞLEŞTİRME

Sistemlere bütüncül bakışta gerek yazılım güvenliği, gerek bileşen güvenliği, gerek araç güvenliği veya sistem altyapısının baştan sona sistematik tasarımı ve yönetimi şarttır.

MBSE Adımlarına doğrudan atıflar, ilgili standartlarda aşağıdaki gibi yer almaktadır.

- Gereksinim Analizi: ISO/SAE 21434, ISO 26262
- Sistem Tanımı: ISO 24089, ISO/SAE 21434
- Doğrulama: ISO 26262, ISO/IEC 27001
- Güncelleme: ISO/IEC 24089

Bu doğrudan atıflar MBSE ile standartların yollarının kesiştiği yegane adımlar olarak değerlendirilmemelidir. Aşağıdaki eşleştirme tablosunda her standardın kendi içindeki adım ve metotların yaşam döngüsü sürecinde sistem mühendisliği ile örtüştüğü adımları göstermektedir.

Aşağıdaki tablo, ISO/SAE 21434, ISO 26262, ISO/IEC 24089 ve ISO/IEC 27001 standartlarının ISO/IEC/IEEE 15288 yaşam döngüsü süreçleri ile entegrasyonunu göstermektedir.

5.2 GEREKÇELENĐİRME

MBSE yaklaşımı, farklı güvenlik standartlarının aynı platformda ele alınmasını sağlayarak bütüncül bir bakış açısı sunar. Geleneksel yöntemlerde fonksiyonel güvenlik, siber güvenlik veya yazılım güncellemeleri genellikle ayrı ayrı yönetilirken, MBSE sayesinde bu disiplinler arasındaki ilişkiler tek bir model üzerinde görselleştirilir ve izlenebilir hale gelir. Bu durum, gereksinimlerin çakışmasını azaltır ve güvenlik hedefleriyle siber güvenlik önlemlerinin tutarlı biçimde uygulanmasını mümkün kılar. Ayrıca dijital ikiz yaklaşımı, yazılım güncellemeleri ve güvenlik testlerinin sahaya çıkmadan önce sanal ortamda doğrulanmasına imkân tanır. Bu sayede hem zaman hem de maliyet açısından önemli avantajlar elde edilir. MBSE, yalnızca standartlara uyum sağlamakla kalmaz, aynı zamanda gelecekteki regülasyon değişikliklerine adaptasyonu da kolaylaştırır. Dolayısıyla, otomotiv yazılımındaki artan karmaşıklığın yönetilmesi için MBSE'nin gerekçesi, yalnızca teknik değil, aynı zamanda stratejik bir zorunluluk olarak ortaya çıkmaktadır.



Şekil 7 TARA Süreci

6. SİSTEM GELİŞTİRMEDE TESTLERİN ROLÜ

Geliştirilen sistemlerin, donanım ve yazılımların gerekli görevleri yerine getirip getirmediğinin kontrolü ancak sistematik doğrulama ile mümkündür.

Doğrulama Hedefleri:

– Maliyet, zamanlama ve performans gereksinimlerinin kabul edilebilir risk seviyeleriyle karşılandığından emin olmak için, en düşük seviyeden sistemin tamamına kadar fiziksel mimarinin doğrulanmasını sağlamak amacıyla belirlenmiş kriterleri kullanmak.

– Sistem tasarım çözümlerinde kullanılacak verileri üretmek ve teknolojileri doğrulamaktır.

Bu doğrulamayı sağlamanın en temel yöntemi ise testtir.

Test, sistemin belirtilen hedefleri (teknik performans, operasyonel etkinlik, operasyonel uygunluk) ne ölçüde karşıladığı, aştığı veya karşılayamadığı konusunda nesnel yargıların yapıldığı araçtır.

Değerlendirmenin amacı, sistematik kararlar almaya yardımcı olmak için testlerden ve diğer araçlardan elde edilen verileri incelemek, analiz etmek ve değerlendirmektir.

6.1. FONKSİYONEL TESTLER

Fonksiyonel testler, sistemin tasarım amaçlarına uygun şekilde çalışıp çalışmadığını ortaya koyar:

- HIL (Hardware-in-the-Loop)
- SIL (Software-in-the-Loop)
- VIL (Vehicle-in-the-Loop)
- Test Senaryosu Örnekleri: Acil frenleme, şerit takip, yazılım güncelleme sonrası fonksiyon kaybı kontrolü

6.2. CANLI TESTLER VE OPERASYONEL İZLEME

Fonksiyonel doğrulamanın ardından sistemlerin gerçek kullanım koşullarında güvenli çalışması için canlı testler kritik öneme sahiptir:

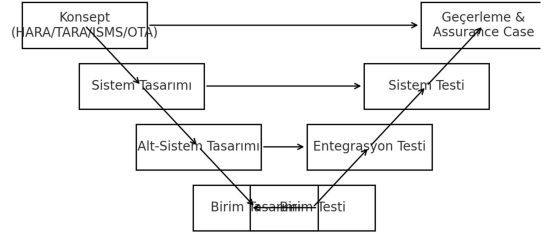
- OTA Güncellemelerinin Testi
- Siber Güvenlik Penetrasyon Testleri
- Operasyonel İzleme
- Saha Geri Bildirimi

7. SİSTEM YAKLAŞIMI

7.1. YAKLAŞIM VE MİMARİ: MBSE + V-MODEL

Önerilen yaklaşım, SysML tabanlı bir MBSE modelinde gereksinimler, mimari, davranış ve doğrulama unsurlarını tek yerde toplayarak V-Model boyunca uçtan uca izlenebilirliği kurar. V-Model'in sol tarafında HARA, TARA, ISMS

ve OTA risk etkinlikleri; sağ tarafında ise birim/entegrasyon/sistem testleri ve entegre assurance case yer alır. Temel prensip, riskten doğan her kararın bir gereksinime ve bir test kanıtına bağlanmasıdır.



ISO 26262 (HARA)ISO/SAE 21434 (TARA)ISO 27001 (ISMS) ISO 24089 (OTA)

Şekil 8 V-Model'de standartların eşlemesi ve izlenebilirlik köprüleri.

7.2. ORTAK RİSK DİLİ VE BİRLEŞİK GEREKSİNİMLER KATMANI

ISO 26262 kapsamında HARA çıktıları güvenlik hedeflerine (Safety Goals) ve fonksiyonel/teknik güvenlik gereksinimlerine (FSC/TSC) dönüşür. ISO/SAE 21434'te TARA, siber güvenlik hedefleri ve konseptini oluşturur; bunlar siber güvenlik gereksinimlerine (CSR) ayrışır. ISO 27001'de ISMS riskleri, geliştirme ve operasyon bağlamında kontrol hedefleri ve Uygulanabilirlik Beyanı (SoA) ile yönetilir. ISO 24089'da OTA riskleri; paket güvenliği, bütünlük/doğrulama, dağıtım kampanyası güvenliği ve rollback kabiliyeti üzerinden ele alınır. Bu dört risk hattı birleşik gereksinimler katmanında birleştirilerek mimari bloklara allocate edilir ve test kapsamı ile ilişkilendirilir.

ve işlevlere odaklayarak TD'yi daha bağlantılı ve daha verimli hale getiriyoruz. Önce donanım yerine yazılım. Bu, geliştirme sürelerimizi yüzde 25 oranında kısaltmamızı sağlayacak - gelecekte araç projeleri, temel yazılım mimarisinin yerleştiği noktadan itibaren 54 ay yerine 40 ayda tamamlanacak, Bu yıl, dönüşüm Wolfsburg'da planlanan Campus Sandkamp geliştirme merkeziyle Grup dışında da görünür hale gelecek. Campus Sandkamp'ı dünyanın en ileri teknolojiye sahip araç geliştirme merkezi yapmak için 800 milyon avro harcayacağız. Bu şekilde, TD'nin Volkswagen'i bir teknoloji şirketine dönüştürme hızını artırdığını vurguluyoruz," diye açıklamaktadır.

Hazırlanan entegrasyon matrisi, bu standartların ISO/IEC/IEEE 15288 yaşam döngüsü süreçleriyle nasıl kesiştiğini ve birbirini nasıl tamamladığını göstermektedir. MBSE, artan yazılım karmaşıklığını tek bir dijital ikiz ortamında yönetmenin anahtarıdır. Fonksiyonel testler ve canlı testler MBSE'nin içinde standartlara bağlanarak izlenebilir hale gelir. Sonuç olarak, otomotiv yazılımındaki büyüme, standartların entegrasyonu olmadan yönetilemeyecek bir karmaşıklığa doğru ilerlemektedir.

MBSE'nin bu standartlara uyumu çok hızlandıracak, ve uyumluluğun hızlı bir şekilde denetlenebilmesi mümkün olacaktır. Modelleme pratiğinin önemli olduğu otomotiv yazılımcılarının bu konuda gelişmesi gerektiğini, kullanabilecekleri tool'lar olduğunu yani bu işlerin soyut şeyler olmadığını, hemen eyleme geçebileceklerini de belirtmek isteriz.

9. SONUÇ

Bu bölümde, çalışmanın sonuçları kısa bir girişle özetlenmekte ve otomotiv sektöründe MBSE yaklaşımıyla standart entegrasyonunun geleceğe yönelik etkilerini vurgulayan ana fikirler madde madde sunulmaktadır.

- MBSE yaklaşımı, güvenlik, siber güvenlik ve yazılım güncellemeleri arasında köprü kurar.
- Otomotiv yazılımındaki artış, standart entegrasyonunu kaçınılmaz hale getirmektedir.
- Sistem mimarisi, gereksinim izlenebilirliği ve varyant yönetiminde kritik rol oynar.
- Fonksiyonel testlerin erken aşamada mimariyle ilişkilendirilmesi kaliteyi artırır.
- Canlı testler, güvenli OTA güncellemeleri ve operasyonel izleme ile desteklenmelidir.

- Entegrasyon matrisi, standartların süreçlerle ilişkisini net biçimde göstermektedir.

- OEM'ler için teknoloji ortaklarıyla entegre çalışma zorunlu hale gelmektedir.

- Dijital ikizler, güvenlik ve güncelleme doğrulamalarını hızlandırır.

- Standartlar arası çakışmalar MBSE ile en aza indirilebilir.

- Gelecekte güvenli yazılım geliştirme, entegrasyon odaklı MBSE yaklaşımıyla sürdürülebilir olacaktır.

REFERANSLAR

Autodesk: <https://www.autodesk.com/design-make/articles/automotive-industry-trends>

PureStorage: <https://blog.purestorage.com/perspectives/the-car-as-code-software-drives-the-automotive-industry/>

SemiEngineering: <https://semiengineering.com/automotive-ecosystem-pivots-around-sdv/>

Slashdev: <https://slashdev.io/-the-evolution-of-automotive-software-development-by-2030>
Businesswire:

<https://www.businesswire.com/news/home/20231229585662/en/Global-Automotive-Software-Market-Report-2023-2028>

TS ISO/IEC 27001:2022 Bilgi güvenliği, siber güvenlik ve kişisel gizliliğin korunması - Bilgi güvenliği yönetim sistemleri - Gereklilikler; TSE

TS EN ISO/IEC 27017:2021 Bilgi teknolojisi - Güvenlik teknikleri – Bulut hizmetlerinde ISO/IEC 27002'ye dayalı bilgi güvenliği kontrolleri için uygulama ilkesi, TSE

TS EN ISO/IEC 27018:2020 Bilgi teknolojisi - Güvenlik teknikleri - PII (Kişi tanımlama bilgisi) işleyen açık bulut ağlarda kişi tanımlama bilgisinin korunması için uygulama prensipleri, TSE

ISO/SAE 21434:2021 Road Vehicles- Cybersecurity Engineering, ISO/SAE

ISO 24089:2023 Road vehicles — Software update engineering, ISO

ISO 26262:2018 -1 Road Vehicles – Functional Safety - Vocabulary, ISO

ISO 26262:2018 -3 Road Vehicles – Functional Safety – Concept , ISO

ISO 26262:2018 -6 Road Vehicles – Functional Safety – Product Development at the Software Level, ISO

ISO 26262:2018 -8 Road Vehicles – Functional Safety – Supporting Processes, ISO

ISO/IEC/IEEE 15288:2015, Systems and Software Engineering – System Life Cycle Processes, ISO/IEC

Model Based System Engineering Ders Notlari, Buyurman Baykal, METU Informatics Institute ION 547

Systems Engineering, Analysis, Design and Development, Charles S. Wasson, Wiley Publishing, 2016

[https://www.volkswagen-newsroom.com/en/press-releases/volkswagen-realigns-technical-development-](https://www.volkswagen-newsroom.com/en/press-releases/volkswagen-realigns-technical-development-shorter-product-cycles-and-faster-digital-offerings-7768)

[shorter-product-cycles-and-faster-digital-offerings-7768](https://www.volkswagen-newsroom.com/en/press-releases/volkswagen-realigns-technical-development-shorter-product-cycles-and-faster-digital-offerings-7768)

Towards a Systems Engineering Methodology for Architecture Development of Vehicle Concepts, Krog, Jonas; Şahin, Tarık; Vietor, Thomas, DS 118: Proceedings of NordDesign 2022, Copenhagen, Denmark, 16th - 18th August 2022

Systems Engineering Fundamentals, US DoD, 2001

Integration Of MBSE Into Existing Development Processes - Expectations And Challenges Johannes Kößler; Kristin, Paetzold 21st International Conference On Engineering Design, ICED17

SysML process chains in MBSE: Systematic literature review and future research directions,

Thomas Schumacher, Chris Kilian Müller, David Inkermann, Digital Engineering Volume 4, March 2025, 100037

Otomotiv Güvenlik Sistemleri için Ökzetik Yapılı Enerji Emicilerin Prototip Performans Değerlendirmesi

Ali Rıza Yıldız¹, Cihan Yakupoğlu², Halil Kırdemir²

¹Bursa Uludağ Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Bursa, TÜRKİYE
Tel: 224 294 19 50 aliriza@uludag.edu.tr

²Akpres Metal Yedek Parça Mak. San. Ve Tic. A. Ş., Ar-Ge Merkezi, Sakarya, TÜRKİYE
Tel: 264 654 59 19 cihan.yakupoglu@akpres.com.tr, halil.kirdemir@akpres.com.tr

Özet- Bu çalışmada araç çarpışmalarında yolcu güvenliğini artırmak amacıyla ökzetik (auxetic) yapıların negatif Poisson oranı özelliklerinden faydalanarak geliştirilen enerji sönümleyici tasarımların yapay zekâ yöntemleriyle optimize edilme çalışmasının devamı niteliğinde olan prototip üretimi konuları ele alınmıştır. Araçlarda çarpışma enerjisinin büyük kısmı darbe kutusu ve tampon kirişi tarafından absorbe edildiğinden, bu bileşenlerin performansı kritik öneme sahiptir. Makalede, ökzetik yapıların deformasyon davranışları tanıtılmış, mevcut ve alternatif enerji yutucu modeller sonlu elemanlar analizleriyle karşılaştırılma yapılan çalışmanın devamı olup Greyser algoritması ve yapay sinir ağları kullanılarak daha hafif, daha yüksek enerji emilimi sağlayan bir model geliştirilmiş; SCGA270D galvanizli sac metalden imal edilerek deneysel testlerle doğrulanmıştır.

Anahtar Kelimeler : Enerji Sönümleyici, Çarpışma Analizi, Optimizasyon Algoritması, Yapay Zeka, Ökzetik Yapı, Sonlu Elemanlar Analizi, SCGA270D Galvanizli Sac Metal

1. GİRİŞ

Otomobillerin geliştirilmesi; güvenlik, titreşim kontrolü, akustik ve ergonomi gibi çok çeşitli gereksinimleri karşılamayı amaçlar ve bu süreç, otomotiv mühendisliğinden bilgisayar bilimine kadar birçok mühendislik disiplini kapsar. Bu gereksinimlerin, sıkı ürün geliştirme takvimleri ve artan rekabet baskıları altında karşılanabilmesi için çeşitli sayısal araçlar geliştirilmiştir. Küresel ticaretteki üssel artış, otomobil sayısında önemli bir yükselişe yol açmış ve bu durum, özellikle önden çarpışmalar olmak üzere trafik kazalarının da artmasına neden olmuştur. Önden çarpışmalarda enerjinin yaklaşık %70'i darbe kutusu (crash box) ve tampon kirişi sistemi tarafından emildiğinden, bu bileşenler araçlar için hayati öneme sahip pasif güvenlik unsurlarıdır.

Özellikle enerji emiciler, araçların çarpışma anında enerji yutma kapasitesinin belirlenmesinde kritik bir rol oynar. Hem sürücülerin hem de yolcuların güvenliğini sağlamak, otomotiv parça tasarımındaki en önemli önceliktir. Tasarımcılar estetik ve satış rakamlarına önem verebilir; ancak asıl hedef, çarpışmaya dayanıklı araçlar geliştirmektir. Bu doğrultuda enerji yutucu bileşenler, yapısal deformasyon yoluyla çarpışma enerjisini gerilme enerjisine dönüştürerek yolcu güvenliğinin sağlanmasında kilit rol oynar. [1]–[18].

Enerji yutucular, taşıtlarda çarpışma esnasında meydana gelen kinetik enerjiyi şekil değişimi yoluyla absorbe eden yapısal elemanlardır. Bu elemanlar tarafından emilen enerji, elastik (geri dönüşümlü) veya plastik (geri dönüşümsüz) deformasyon şeklinde gerçekleşebilir. Ancak, taşıt güvenliği açısından arzu edilen durum, çarpışma enerjisinin büyük bir kısmının kalıcı plastik deformasyon yoluyla geri dönüşümsüz olarak sönümlenmesidir.

Enerjinin bu şekilde etkili biçimde yutulması; çarpışma hızı, çarpışmanın yönü ve türü, enerji yutucunun geometrik özellikleri, deformasyon türleri ile kullanılan malzemenin mekanik özellikleri gibi birçok değişkene bağlıdır. Bu parametrelerin etkileşimi, enerji yutucunun performansını ve yolcu güvenliği üzerindeki etkinliğini doğrudan belirlemektedir. Bu nedenle, enerji yutucu bileşenlerin tasarımı, söz konusu parametrelerin ayrıntılı analizini içeren çok disiplinli bir mühendislik yaklaşımını gerektirir.

Enerji yutucu tasarımında dikkat edilmesi gereken önemli bir diğer faktör ise ezilme kuvvetleridir. Çarpışma sırasında enerji yutuculara etki eden darbe kuvvetlerinin yeterli oranda sönümlenememesi durumunda, bu kuvvetler doğrudan taşıtın yolcu bölmesine iletilir. Bu durum hem yolcu yaralanmalarının artmasına hem de taşıtta daha ciddi yapısal hasarların oluşmasına yol

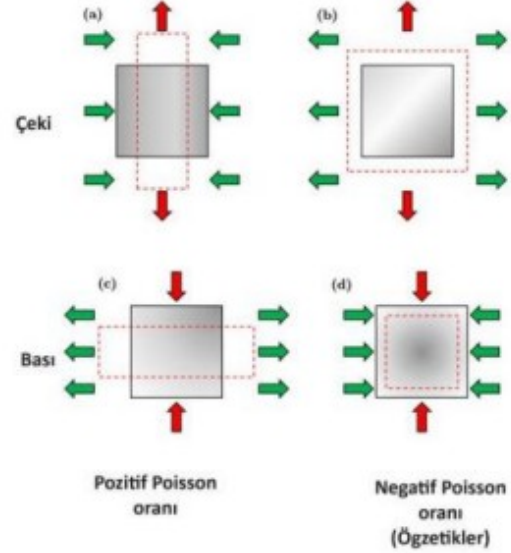
açmaktadır. Bu nedenle enerji yutucu tasarımında, ortalama ezilme kuvvetlerinin mümkün olduğunca yüksek, ilk tepki kuvvetinin ise düşük olması hedeflenmelidir. Böylelikle, yüksek enerji emilimi sağlanırken, yolcu kabinine aktarılan ani yüksek kuvvetlerin önüne geçilmiş olur. Bu gereklilik, enerji yutucunun hem deforme olabilen hem de uygun geometrik yapıya sahip bir tasarımla geliştirilmesini zorunlu kılar.

Yıldız, Yıldız ve Yakupoğlu (2024) tarafından geliştirilen teorik modelde, SCGA27D galvanizli çelikten üretilen ökzetik enerji emici yapıların çarpışma dayanımını artırmak amacıyla yapay sinir ağı destekli geyser ilhamlı algoritma (GEA) kullanılmıştır. Bu çalışma, enerji emici geometrilerin optimizasyonuna yönelik güçlü bir teorik çerçeve sunmaktadır [19]. Ancak söz konusu araştırma yalnızca sayısal simülasyonlara dayanmaktadır ve deneysel doğrulama içermemektedir.

Bu makalede sunulan çalışma, söz konusu teorik yaklaşımın deneysel olarak test edilmesini ve doğrulanmasını amaçlamaktadır. GEA algoritmasıyla optimize edilen ökzetik yapıların gerçek çarpışma koşullarındaki davranışı, fiziksel prototipler ve deneysel analizler yoluyla değerlendirilmiştir. Böylece, Yıldız et al. (2024) tarafından önerilen teorik modelin pratik geçerliliği deneysel olarak ortaya konmuştur.

2.ÖKZETİK YAPILAR

Genellikle "auxetics" olarak bilinen yeni bir malzeme sınıfı, kendilerine ayırt edici deformasyon özellikleri veren yapılara sahiptir ve üzerlerine kuvvet etki ettiğinde farklı şekillerde deforme olurlar. Pozitif poisson oranına sahip malzemeler, Şekil 1 a'da gösterildiği gibi, boyuna yönde çekme durumunda enine yönde büzülürken, bası yüklemesi durumunda eksenel olarak genişlediği geleneksel bir şekilde davranır. Bir malzemenin yük altında nasıl deforme olduğunun bir ölçüsünü gösteren enine gerinimin eksenel gerinime ters oranı Poisson oranı olarak bilinir. Bir çekme kuvvetine tepki olarak eksenel olarak uzayan ancak enine büzülen veya basınç kuvveti altında eksenel olarak büzülürken enine genişleyen bir malzeme pozitif bir Poisson katsayısına sahiptir. Ökzetik (Auxetic) davranışa sahip malzeme ise, gerilim altında bir veya daha fazla ortogonal yönde eksenel yönde genişleyerek negatif Poisson oranı sergiler (Şekil 1b). Basınç kuvvetleri altında, ökzetik yapılar hem eksenel hem de enine yönlerde büzülür (Şekil 1d).

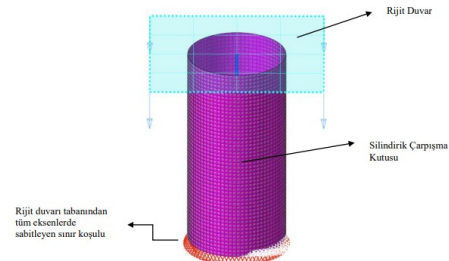


Şekil1. Pozitif ve negatif Poisson oranına sahip malzemelerin çekme ve bası yüklemeleri altında sergilediği davranış [20]

Bu malzemeler için uygulama yelpazesi oldukça geniş olup spor, ökzetik köpükler, askeri kullanım, biyomedikal, tekstil ve otomotiv uygulamalarında kullanılmaktadır.

3.TASARIM VE ANALİZ

Mevcut enerji yutucunun ve ökzetik modeller ile oluşturulmuş olan alternatif enerji yutucunun detaylı bir kıyaslaması yapılmıştır. Bu kapsamda enerji yutucuların tüm sonlu elemanlar analizleri, aynı malzeme değerleri girilerek ve aynı sınır şartları altında gerçekleştirilmiştir. Mevcut enerji yutucuya ait üç boyutlu model Şekil 2' de gösterilmektedir. Çarpışma kutuları silindirik geometriye sahip kalınlığı 2 mm olan saç metalden üretilmekte olup alternatif tasarımlarda da bu değerler kullanılacaktır. Buradaki silindirik geometrinin referans çapı 55 mm ve boyu 143 mm'dir. Alternatif enerji yutucu tasarımı çalışmalarında mevcut çarpışma kutusunu ökzetik özellik gösteren yapıda oluşturabilmek için mevcut enerji yutucu modeline farklı geometrilerde delikler açılmıştır.



Şekil 2. Sınır şartları

Mevcut ve geliştirilen alternatif enerji yutucu tasarımları Şekil 2’de gösterilen sınır şartları altında, çarpışma enerjisi 3 kJ olan rijit duvar tarafından ezilerek sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiştir.

Mevcut enerji yutucusu (Şekil 3) baz alınarak ve geometrik boyutlar değiştirilmeden üzerinde akıllı delik modeller açılarak temelde dört farklı model ve onların varyasyonları üzerine çalışarak farklı çarpışma kutusu modeli tasarlanmıştır. Tasarım aşamasında enerji yutucu modelleri tasarım programında yüzey olarak modellenmiştir. Yapılan sonlu elemanlar analizleri neticesinde Şekil 5 ve Şekil 7’deki modellerin çarpışma performansı açısından en iyi modeller olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Yıldız, Yıldız ve Yakupoğlu (2024) tarafından geliştirilen teorik modelde, SCGA27D galvanizli çelikten üretilen ökzetik enerji emici yapıların çarpışma dayanımı, yapay sinir ağı destekli geyser ilhamlı algoritma (GEA) ile optimize edilmiştir. Bu çalışma, sonlu elemanlar analizleriyle elde edilen sayısal simülasyonlara dayanmaktadır [19]. Bu makalede ise söz konusu teorik model, bilgisayar ortamında gerçekleştirilen sonlu elemanlar analizleriyle yeniden değerlendirilmiş ve deneysel doğrulama için tablo 1 ‘deki veriler temel alınmıştır.

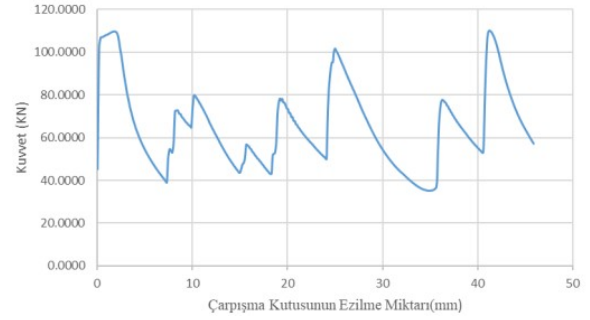


Şekil 3. Mevcut silindir enerji yutucu modeli

TABLO 1. Mevcut dairesel kesitli enerji yutucu modelin sonlu elemanlar analiz sonuçları

Özellikler	Analiz Sonuçları
Kütle (kg)	0,3879
Maksimum Kuvvet (kN)	110,1108
Ortalama Kuvvet (kN)	65,5901
Verim %	59,5673
EA (kJ)	3,0015

SEA (kJ/kg)	7,7382
Çarpışma kutusunun ezilme miktarı (mm)	45,8917



Şekil 4. Mevcut enerji yutucu analizi kuvvet-ezilme miktarı grafiği

Tablo 1’ de verilen mevcut dairesel kesitli enerji yutucunun sonlu elemanlar analizi sonucu incelendiğinde elde edilen maksimum kuvvetin fazla olduğu görülmektedir. Maksimum kuvvetin değerinin yüksek olması yolcuların çarpışma esnasında zarar görmesine sebep olur. Akıllı modeller (ökzetik yapılar) ile oluşturulan çarpışma kutularında bu değerin azaltılması hedeflenmektedir.

Şekil 4’te çarpışma esnasında yolculara gelen kuvvetin çarpışma kutusunun ezilme miktarına göre değişimi verilmiştir. Şekildeki Şekil incelendiğinde yolcu kabinine iletilen kuvvetlerde ani değişimler olduğu görülmektedir.

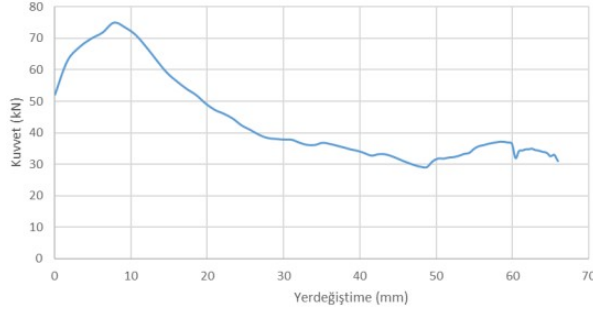


Şekil 5. Paralel yapılarla oluşturulmuş olan boşluklu çarpışma kutusu modeli

TABLO 2. Boşluk bırakılarak oluşturulmuş akıllı paralel delikli yapının çarpışma performans değerleri

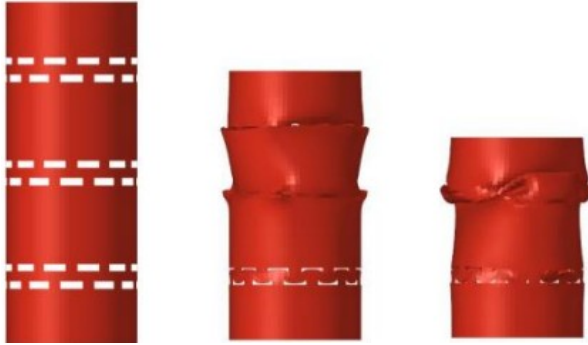
Özellikler	Analiz Sonuçları
Kütle (kg)	0,3420
Maksimum Kuvvet (kN)	74,9209

Ortalama Kuvvet (kN)	40,2821
Verim %	53,7661
EA (kJ)	2,9285
SEA (kJ/kg)	8,5631
Çarpışma kutusunun ezilme miktarı (mm)	65,9312



Şekil 6. Boşluk bırakılarak oluşturulmuş paralel delikli yapının Kuvvet-Yer değiştirme grafiği

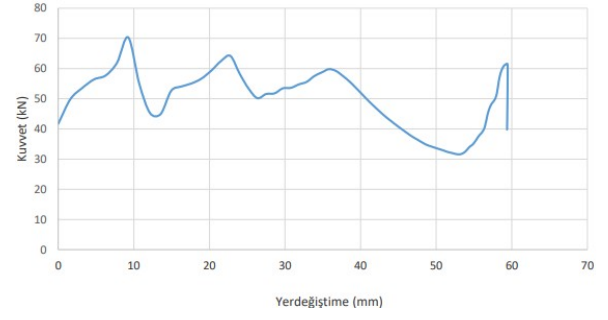
Paralel yapılarla oluşturulmuş olan boşluklu çarpışma kutusu modeli Şekil 6'da görüleceği gibi daha kararlı bir şekilde ezilmiştir.



Şekil 7. Aralıklı yapıda oluşturulmuş olan boşluklu çarpışma kutusu modeli

TABLO 3. Aralıklı yapının çarpışma performans değerleri

Özellikler	Analiz Sonuçları
Kütle (kg)	0,3570
Maksimum Kuvvet (kN)	70,3328
Ortalama Kuvvet (kN)	48,8781
Verim %	69,4955
EA (kJ)	3,0068
SEA (kJ/kg)	8,4215
Çarpışma kutusunun ezilme miktarı (mm)	59,4523

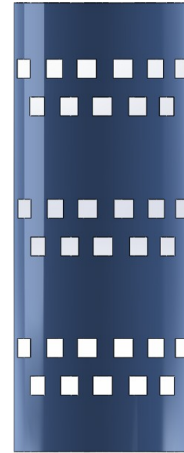


Şekil 8. Aralıklı yapının Kuvvet-Yer değiştirme grafiği

Aralıklı yapıda oluşturulmuş olan boşluklu çarpışma kutusu modeli Tablo 3'te de görüleceği üzere verimi en yüksek model olmuştur.

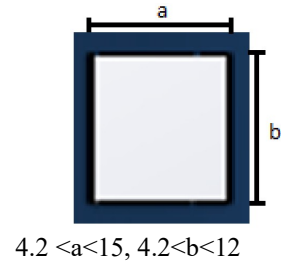
4. TASARIMIN OPTİMİZASYONU

Yapılan çalışmalar neticesinde geliştirilen tasarımlar içerisinde en iyi özelliklere sahip olarak belirlenen model imal edilebilirlik parametreleri dikkate alınarak Şekil 9'daki gibi yeniden tasarlanmıştır.



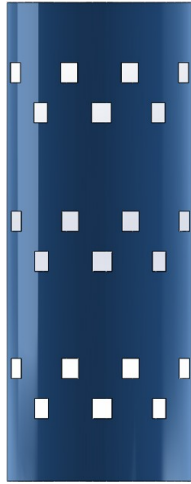
Şekil 9. Optimizasyon çalışmaları için başlangıç modeli

Bu modele ait geometrik alt ve üst sınırlar üretilebilirlik göz önünde bulundurularak Şekil 10'daki gibi belirlenmiştir.



Şekil 10. Tasarım değişkenleri

Latin hiperküp örnekleme (Latin hypercube sampling) yöntemi kullanılarak matlab ortamında değişkenler $4.2 < a < 15$, $4.2 < b < 12$ aralığında olacak şekilde 20 farklı tasarımın boyutları belirlenmiş ve üç boyutlu olarak modellenmiştir. Her bir tasarım için belirlenen sınır şartları altında sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilerek her bir parçanın ağırlık, maksimum kuvvet ve enerji sönümleme miktarları belirlenmiştir. Matlab neural network toolbox'ı kullanarak amaç ve kısıt fonksiyonları için gerekli denklemler elde edilmiştir. Geliştirilen greyser optimizasyon algoritması kullanılarak optimizasyon çalışması yapılmış ve optimum model belirlenmiştir. Optimizasyon çalışmasında amaç fonksiyonu olarak ağırlığın azaltılması tanımlanmıştır. Kısıt fonksiyonları olarak ise enerji emilim miktarının mevcut modelin enerji sönümleme miktarına eşit veya daha büyük olması, maksimum kuvvetinde mevcut enerji sönümleyicinin maksimum kuvvetine eşit veya daha küçük olması tanımlanmıştır. Greyser optimizasyon algoritması kullanılarak yapılan optimizasyon çalışması sonucunda optimum enerji sönümleyici geometrisi aşağıdaki Şekil 11'deki gibi elde edilmiştir.



Şekil 11. Optimum model

5. OPTİMİZE EDİLEN ENERJİ SÖNÜMLEYİCİNİN İMAL EDEİLMESİ VE DENEY SONUÇLARI

5.1. Optimize Edilen Enerji Sönümleyicinin İmal Edilmesi

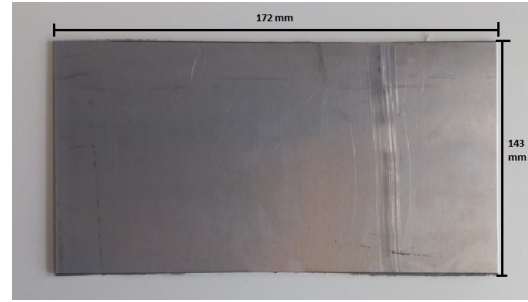
Geliştirilen greyser optimizasyon algoritması kullanılarak optimizasyon çalışması ile bilgisayar ortamında belirlenen Şekil 11'deki optimum model Şekil 12'deki gibi kalınlığı 2mm olan SCGA270D galvanizli sac metal levhadan imal edilmiştir. İmal edilirken 143mm x 172mm ebatlarında lazer makinesinde sac metal levha kesilmiş ardından

kesilen saclara belirlenen ölçülerde delikler açılmıştır. Sonrasında delinen sac, rulo haline getirilip kaynak yapılarak birleştirilmiştir. Kullanılan sac metalin malzeme özellikleri Tablo 4'te verilmiştir.

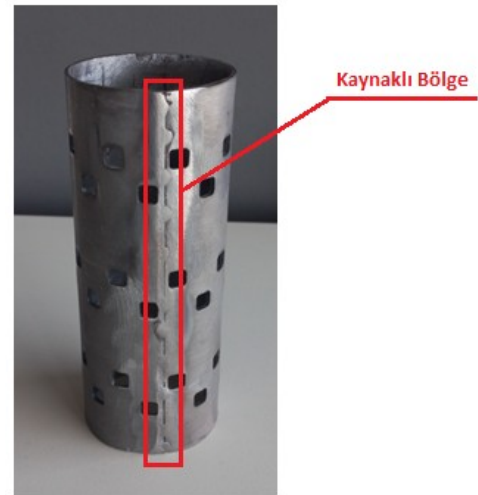
TABLO 4. SCGA270D Sac metalinin malzeme özellikleri

Akma Dayanımı (N/mm ²)	0.4 ≤ d < 0.8 mm için 180–235 N/mm ² (18.9–31.1 kg/mm ²)
Çekme Dayanımı (N/mm ²)	270 N/mm ² (27.6 kg/mm ²)
Uzama Oranı (%)	min %41, max %56
Plastik şekil değişimi oranı	min 1.4
Gerilme-şekil değişimi katsayısı	min 0.2

İmal edilen numunun üretim aşamaları Şekil 12-14'te gösterilmiştir.



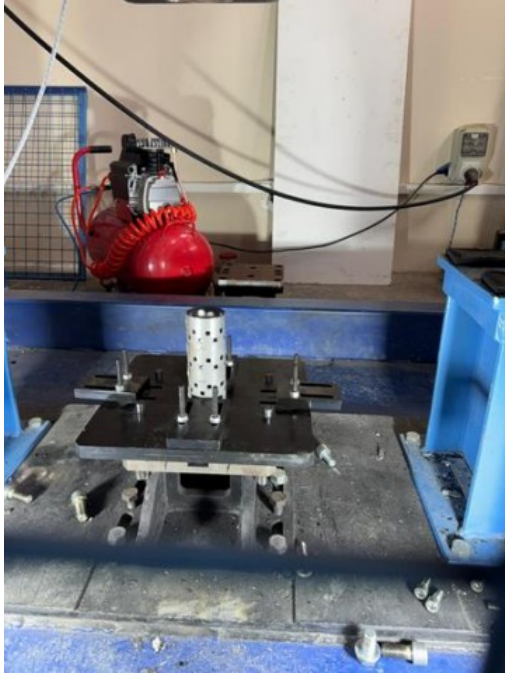
Şekil 12. Numunenin sac levha hali



Şekil 13. Numunenin rulo yapılıp kaynaklanmış hali



Şekil 14. Numunenin imal edilmiş son hali
İmal edilen numuneye Şekil 15-17 arasında gösterildiği gibi deneyler gerçekleştirilmiştir.



Şekil 15. Test öncesi enerji sönümleyici



Şekil 16. Test sırasında enerji sönümleyici



Şekil 17. Test sonrası enerji sönümleyici

5.2. Deney Sonuçları

Şekil 15-17 arasında gösterilen deneysel olarak verilerin elde edilmesi işlemi gerçekleştirilmiştir. Enerji emilimi 3.40 kJ iken parça kaynaklı üretildiğinde enerji emilimi 4.07 kJ ve deneysel(prototip) olarak 5.34 kJ bulunmuştur. Özgül enerji emilimi yani kilogram başına enerji sönümleme miktarı bilgisayar analizlerinde 13.96 kJ/kg bulunmuş iken deneylerde(prototip) 18.35 kJ/kg elde edilmiştir. Maksimum kuvvet bilgisayar

analizlerinde 130.773 kN bulunmuş iken deneylerde (prototip)165.7 kN bulunmuştur.

İmal edilen parça ile optimum parçanın dinamik koşullarda serbest düşme testi ile deneysel analiz sonuçları Tablo 5'te verilmiştir.

TABLO 5. Sonuçlar -1

	Analiz Ortamı	Kütle (gram)	Maksimum Kuvvet(kN)	Enerji Emilimi(kN)	Özgül Enerji Emilimi(kj/kg)
Mevcut Model	Sonlu Elemanlar Analizi	655,9	104,853	3,36	5,127
Geliştirilen Model	Sonlu Elemanlar Analizi	291,4	102,893	3,40	11,68
Kaynaklı Model	Sonlu Elemanlar Analizi	291,4	130,773	4,07	13,96
Deneysel Sonuçlar	Prototip Test	291,4	165,7	5,34	18,35

Tablo 6'dan da görüleceği üzere mevcut modelin ağırlığı 655,9 gram iken greyser algoritması ve yapay sinir ağları kullanılarak elde edilen modelin ağırlığı 291.4 grama düşürülmüş ve %55,57 oranında ağırlık azalması sağlanmıştır. Maksimum kuvvet 104.853'ten 102.893'e azalarak yüzde 1,86

azaltılmıştır. Enerji sönümleme miktarı 3.36'dan 3.40 'a yüzde 1,26 artırılmıştır. Özgül enerji Emilimi miktarı 5.127'den 11.68'e çıkartılarak yüzde 127,92 oranında artırılmıştır.

TABLO 6. Sonuçlar -2

	Kütle(gram)	Maksimum Kuvvet(kN)	Enerji Emilimi(kN)	Özgül Enerji Emilimi(kj/kg)
Mevcut Model	655,9	104,853	3,36	5,127
Geliştirilen Model	291,4	102,893	3,40	11,68
Değişim(%)	-55,57	-1,86	1,26	127,92

Bu çalışma, Yıldız, Yıldız ve Yakupoğlu (2024) tarafından önerilen teorik çerçevenin deneysel doğrulamasını sunmaktadır. Söz konusu çalışmada, SCGA27D galvanizli çelikten üretilen auxetik enerji emici yapıların çarpışma dayanımı, yapay sinir ağı destekli geyser ilhamlı algoritma (GEA) kullanılarak optimize edilmiştir [19]. Ancak ilgili araştırma yalnızca sayısal simülasyonlarla sınırlıdır. Bu makalede ise söz konusu teorik model, bilgisayar ortamında gerçekleştirilen sonlu elemanlar analizleri ve fiziksel deneyler aracılığıyla genişletilmiştir. Böylece bu çalışma, referans alınan araştırmanın bulgularını tamamlayıcı nitelikte olup, deneysel kanıtlarla desteklemektedir.

6. REFERANSLAR

[1] M. U. Erdaş, B. S. Yildiz, and A. R. Yildiz, "Crash performance of a novel bio-inspired energy absorber produced by additive

manufacturing using PLA and ABS materials," Mater. Test., vol. 66, no. 5, pp. 696–704, 2024. <https://doi.org/10.1515/mt-2023-0384>.

[2] E. Demirci and A. R. Yıldız, "An experimental and numerical investigation of the effects of geometry and spot welds on the crashworthiness of vehicle thin-walled structures," Mater. Test., vol. 60, no. 6, pp. 553–561, 2018a, <https://doi.org/10.3139/120.111187>.

[3] M. A. Guler, M. E. Cerit, B. Bayram, B. Gerceker, and E. Karakaya, "The effect of geometrical parameters on the energy absorption characteristics of thin-walled structures under axial impact loading," Int. J. Crashworthiness, vol. 15, no. 4, pp. 377–390, 2010, <https://doi.org/10.1080/13588260903488750>.

[4] L. Gu, R. J. Yang, C. H. Cho, M. Makowski, M. Faruque, and Y. Li, "Optimization and robustness

for crashworthiness,” *Int. J. Veh. Des.*, vol. 26, no. 4, pp. 348–360, 2001.

[5] S. S. Hsu and N. Jones, “Quasi-static and dynamic axial crushing of thin-walled circular stainless steel, mild steel and aluminium alloy tubes,” *Int. J. Crashworthiness*, vol. 9, no. 2, pp. 195–217, 2004, <https://doi.org/10.1533/ijcr.2004.0282>.

[6] N. K. Gupta, G. L. Easwara Prasad, and S. K. Gupta, “Plastic collapse of metallic conical frusta of large semi-apical angles,” *Int. J. Crashworthiness*, vol. 2, pp. 349–366, 1997, <https://doi.org/10.1533/cras.1997.0054>.

[7] M. Kiani and A. R. Yildiz, “A comparative study of non-traditional methods for vehicle crashworthiness and NVH optimization,” *Arch. Comput. Methods Eng.*, vol. 23, no. 4, pp. 723–734, 2016, <https://doi.org/10.1007/s11831-015-9155-y>.

[8] A. R. Yildiz and K. Solanki, “Multiobjective optimization of vehicle crashworthiness using new particle swarm based approach,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 59, nos. 1–4, pp. 367–376, 2012, <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3496-y>.

[9] G. Mamalis, D. E. Manolacos, M. B. Ioannidis, P. K. Kostazos, and G. Hassiotis, “Finite element simulation of the axial collapse of thinwall square frusta,” *Int. J. Crashworthiness*, vol. 6, no. 2, pp. 155–164, 2001, <https://doi.org/10.1533/cras.2001.0169>.

[10] V. M. Karbhari and X. Chaoling, “Energy absorbing characteristics of circular frustra,” *Int. J. Crashworthiness*, vol. 8, no. 5, pp. 471–478, 2003, <https://doi.org/10.1533/cras.8.5.471.19266>.

[11] E. Demirci and A. R. Yıldız, “An investigation of the crash performance of magnesium, aluminum and advanced high-strength steel s and different cross-sections for vehicle thin-walled energy absorbers,” *Mater. Test.*, vol. 60, nos. 7–8, pp. 661–668, 2018b, <https://doi.org/10.3139/120.111201>.

[12] G. M. Nagel and D. P. Thambiratnam, “Dynamic simulation and energy absorption of tapered tubes under impact loading,” *Int. J. Crashworthiness*, vol. 9, no. 4, pp. 389–399, 2004, <https://doi.org/10.1533/ijcr.2004.0298>.

[13] S. J. Hosseini pour and G. H. Daneshi, “Energy absorption and mean crushing load of thin-walled grooved tubes under axial compression,” *Thin-Walled Struct.*, vol. 41, no. 1, pp. 31–46, 2003, [https://doi.org/10.1016/s0263-8231\(02\)00099-x](https://doi.org/10.1016/s0263-8231(02)00099-x).

[14] S. Lee, C. Hahn, M. Rhee, and J. Oh, “Effect of triggering on the energy absorption capacity of axially compressed aluminum tubes,” *Mater. Des.*, vol. 20, pp. 31–40, 1999, [https://doi.org/10.1016/s0261-3069\(98\)00043-0](https://doi.org/10.1016/s0261-3069(98)00043-0).

[15] E. Acar, M. A. Guler, B. Gerceker, M. E. Cerit, and B. Bayram, “Multiobjective crashworthiness optimization of tapered thinwalled tubes with axisymmetric indentations,” *Thin-Walled Struct.*, vol. 49, pp. 94–105, 2011, <https://doi.org/10.1016/j.tws.2010.08.010>.

[16] S. R. Reid and T. Y. Reddy, “Static and dynamic crushing of tapered sheet metal tubes of rectangular cross-section,” *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 28, pp. 623–637, 1986, [https://doi.org/10.1016/0020-7403\(86\)90077-9](https://doi.org/10.1016/0020-7403(86)90077-9).

[17] Y. Liu, “Design optimisation of tapered thin-walled square tubes,” *Int. J. Crashworthiness*, vol. 13, no. 5, pp. 543–550, 2008, <https://doi.org/10.1080/13588260802222102>.

[18] S. Salehghaffari, M. Rais-Rohani, and A. Najafi, “Analysis and optimization of externally stiffened crush tubes,” *Thin-Walled Struct.*, vol. 49, no. 3, pp. 397–408, 2011, <https://doi.org/10.1016/j.tws.2010.11.010>.

[19] Yıldız, B. S., Yıldız, A. R., & Yakupoğlu, C. (2024). Enhanced crashworthiness performance of auxetic structures using artificial neural network and geyser inspired algorithm. **Materials Testing**. <https://doi.org/10.1515/mt-2024-0233>

[20] Junio, R.F.P.; da Silveira, P.H.P.M.; Neuba, L.d.M.; Monteiro, S.N.; Nascimento, L.F.C. Development and Applications of 3D Printing-Processed Auxetic Structures for HighVelocity Impact Protection: A Review. *Eng* 2023, 4, 903–940. <https://doi.org/10.3390/eng4010054>

OTOMOTİV ARGE MÜHENDİSİ YETKİNLİK GELİŞİM PROGRAMI

Doç. Dr. İsmail DURGUN

ID ARGE Eğitim & Danışmanlık, Bursa / TÜRKİYE
Tel: 532 373 53 11 E-Posta ismaildurgun67@gmail.com

Özet- Otomotiv sektörü, teknolojik yeniliklerin hızla ilerlediği ve rekabetçi pazar şartlarının etkisiyle dünyanın en dinamik endüstrilerinden biri haline gelmiştir. Elektrikli ve otonom araçların gelişimi, sürdürülebilirlik odaklı yaklaşımlar ve dijital dönüşüm projeleri gibi çeşitli alanlarda öncü olan sektör, nitelikli AR-GE mühendislerine olan ihtiyacı her geçen gün artırmaktadır. Bu mühendislerin teknik uzmanlıklarının yanı sıra yenilikçilik, problem çözme, ekip çalışması ve sürdürülebilirlik gibi kişisel ve mesleki yetkinliklerini de geliştirmeleri gerekmektedir.

Bu çalışma, otomotiv AR-GE mühendisinin iş ortamında çıkan karmaşık sorunlarla başa çıkabilmesini ve yenilikçi çözümler üretebilmesini sağlayacak bir yetkinlik gelişim programı sunmaktadır. Program, otomotiv sektöründe faaliyet gösteren firmaların ihtiyaç duyduğu yetkinliklerin tespiti ile başlamış, insan kaynakları ve Ar-Ge yöneticilerinin önerileri ile şekillendirilmiştir. Farklı illerde gerçekleştirilen program bölgesel ihtiyaçlara da hizmet verecek şekilde tasarlanmıştır. Program otomotiv sektöründe yeni göreve başlayacak mühendisler ile gerçekleştirilmiştir. Program sonunda elde edilen veriler ışığında yeni iş başı yapacak mühendisler için kazanılması gereken yetkinlikler ve bunun için alınması gerekli eğitimler önerilmektedir.

ANAHTAR SÖZCÜKLER: Otomotiv, Eğitim, Yetkinlik, Ar-Ge, Tasarım

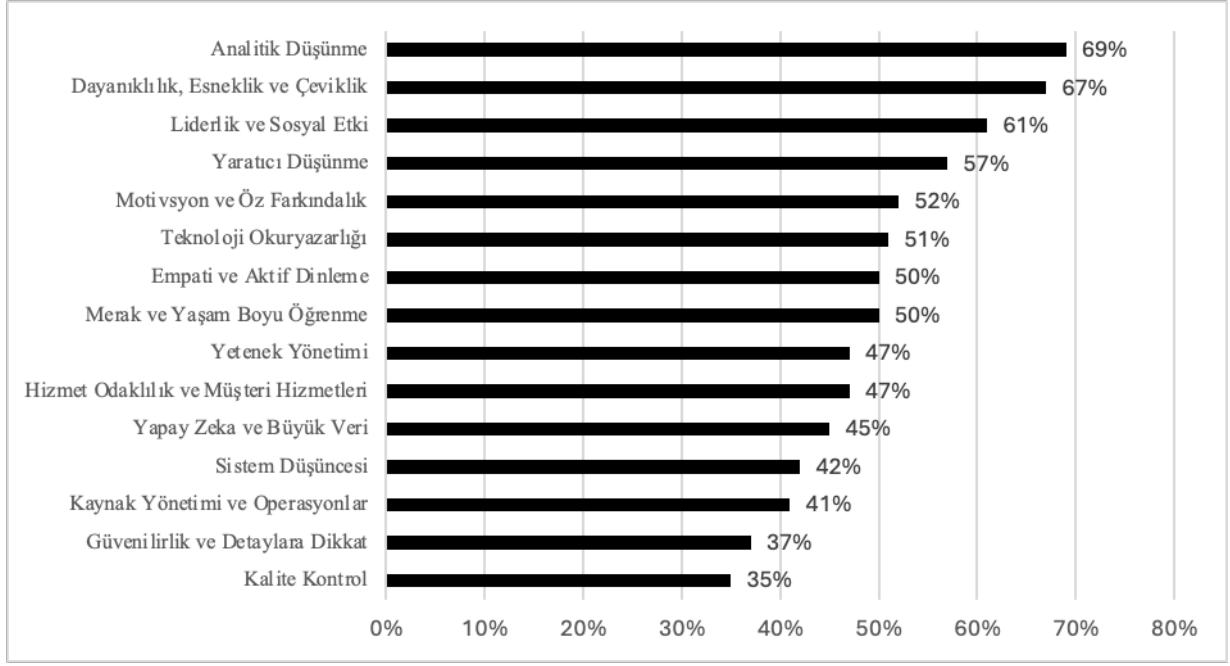
1. GİRİŞ

Otomotiv sanayi ileri teknoloji ve büyük sermaye yatırımı gerektirse de gerek oluşturduğu katma değer ve sağladığı istihdam olanağıyla, gerekse de üretimde kullandığı girdileri tedarik ettiği sektörlerle gerçekleştirdiği yakın iş birliği nedeniyle, ülke ekonomilerindeki lokomotif sektörlerin başında gelmektedir (1). Uludağ Otomotiv Endüstrisi İhracatçıları Birliği (OİB) verilerine göre,

Türkiye ihracatının lider sektörü olan otomotiv endüstrisinin 2024 yılı ihracatı bir önceki seneye göre yüzde 6,3 oranında artarak 37 milyar 212 milyon dolar oldu. Geçen yıl da Türkiye ihracatında ilk sıradaki yerini koruyan otomotiv sektörü, böylece 2022 yılı dışında 2006 yılından bu yana aralıksız ihracat liderliğini sürdürmeyi başardı (2).

Ülkemizde firma içlerinde kurulu bakanlık onaylı Ar-Ge ve Tasarım merkezlerinin sayıları hızla artmaktadır. Otomotiv ve Otomotiv Tedarik Sanayi firmalarında kurulu 167 Ar-Ge Merkezi ve 35 Tasarım Merkezi vardır. Ülke genelinde 1360 Ar-Ge merkezi olduğu düşünüldüğünde toplam Ar-Ge merkezlerinin %12'si ve toplam 342 olan tasarım merkezlerinin de %10'u otomotiv sektöründe yer almaktadır (3). Otomotiv sektörü rekabetçiliğini arttırmak ve katma değeri yüksek ürünleri ihraç etmek için bu merkezlerde önem vermektedir. Bununla birlikte bu merkezlerde görev yapacak istenilen yetkinlikte personel bulma konusunda zorluk yaşanmaktadır. Otomotiv ana sanayi firmaları yeni projeleri başladığında daha fazla Ar-Ge personeline ihtiyaç duyup sektörde deneyimli mühendisleri bünyelerine katmaktadır. Bu mühendislerde genellikle otomotiv tedarik firmalarından olmaktadır. Bu nedenle yetişmiş personel açığı otomotiv tedarikçi firmalarında daha fazla olmaktadır. Bu program ile bu açığın kapatılması ve firmaların ihtiyaç duyduğu yetkinliğe sahip genç mühendislerin sektöre kazandırılması amaçlanmıştır.

Ayrıca tüm dünyadaki teknolojik ve dijital alandaki gelişmeler iş verenlerin çalışanlardan beklentilerini de hızla değiştirmektedir (Şekil 1). Bu çalışmada eğitimler planlanırken katılımcıların önümüzdeki yıllarda da sektörde başarı ile çalışabilmeleri için gerekli yetkinliklere sahip olmaları da göz önünde bulundurulmuştur.



Şekil 1: 2025 Yılı Temel Becerileri (4)

2. PROGRAM BEKLENTİLERİNİN BELİRLENMESİ

Bu çalışmaya sektörün beklentilerinin belirlenmesi için farklı illerde faaliyet gösteren otomotiv ana sanayi ve tedarikçilerinin Ar-Ge mühendisleri için düzenledikleri eğitimlerin belirlenmesi ile başlanılmıştır. Bunun için yüz yüze yapılan toplantılar yanında hazırlanan bir anket çalışması da yapılmıştır. Yapılan anket sonrasında çoğunluğun vermiş olduğu eğitimlerin bir listesi oluşturularak eğitim programında verilecek eğitimler belirlenmiştir. Otomotiv teknolojileri veya özel üretim yöntemlerine ait eğitimler programa dahil edilmemiştir. İsim olarak belirlemenin bir adım önüne geçmek için bu eğitimlerin içerikleri oluşturulmuş ve bu içerikler firmalar ile paylaşılarak görüşleri alınmıştır. Yapılan geri bildirimler sonrasında program eğitimlerinin içerikleri netleştirilmiştir. Netleştirilen eğitim ve içerikleri sonrasında öncelikle programa destek olan firmalarda bu eğitimleri verebilecek olan bir personel olup olmadığı sorgulanmıştır. Burada önerilen eğitmenlerin daha önce bu eğitimi en azından kendi firma çalışanlarına vermiş olması şartı aranmıştır. Programdaki eğitimler genel olarak firma önerileri de dikkate alınarak profesyonel eğitmenlerden alınmıştır.

Program eğitimlerinin belirlenmesi çalışmalarına bu programının hangi mühendislik dalları için düzenleneceğinin netleştirilmesi ile başlanılmıştır. Tüm mühendislik dalları için aynı programın düzenlenmesi uygun olmayacağı için belirlenen mühendislik dallarına göre bazı eğitimler programa dahil edilmemiştir. Firmalar ile yapılan toplantılar sonucunda belirlenen mühendislik dalları;

- Otomotiv Mühendisi
- Makine Mühendisi
- İmalat Mühendisi

- Mekatronik Mühendisi
- Uçak Mühendisi
- Gemi İnşa Mühendisi
- Endüstri Mühendisliği
- Raylı Sistemler Mühendisi

Program hem sosyal medyada hem de üniversitelerde duyurulmuş ve çok sayıda başvuru almıştır. Çok sayıda başvurunun olacağı düşüncesiyle başlangıçta bazı sınırlamalar konulmuştur. Bu sınırlamalar şu şekildedir;

- Son sınıfta ve başvuru yılında mezun olacak durumda olmak veya yüksek lisans yapıyor olmak.
- Bir iş yerinde çalışmamak.
- Programın düzenleneceği ilde ikamet etmek veya kalabileceği bir yerinin olması
- İngilizce dil bilgi seviyesi (YDS veya YÖKDİL sınavlarından 60 puan ya da dengi başka bir sınav sonucu)
- En az %80 devam zorunluluğu

Katılımcılar programa başvuran ve ön elemenden geçen adaylar arasından bir jüri tarafından yapılan bir mülakat sonucu belirlenmiştir. Jüri programa destek veren firmaların insan kaynakları veya Ar-Ge uzman veya yöneticileri tarafından oluşturulmuştur. Jüride en az üç firmadan temsilci bulundurulmuş ve değerlendirilmelerinin ortalaması adayın puanı olarak belirlenmiştir. Farklı firma temsilcilerinin jüride yer almasını sağlayarak daha homojen bir değerlendirme yapılması ve tek bir firmanın değil de sektörün düşünülerek değerlendirmenin gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Jürinin değerlendirme aşamasında kullanması için bir puanlama tablosu kullanması sağlanmıştır. Bu sayede farklı jüri üyelerinin değerlendirmesinde bir standarda gidilmesi amaçlanmıştır.

Jüri üyelerinden beklenti programı başarı ile tamamladıklarında şirketlerine alabilecekleri seviyede adayların belirlenmesi olmuştur.

Katılımcıların sektörü daha yakından tanıyabilmeleri için eğitimlerin programı destekleyen firmaların akademi binalarında gerçekleştirilmesi sağlanmıştır. Bu sayede adaylara ulaşım ve yemek desteği de sağlanmıştır.

3. PROGRAM İÇERİĞİNİN BELİRLENMESİ

Programa destek veren firmalar ile görüşmeler sonrasında 50 günlük (300 saat) bir program oluşturulmuştur. Programda 42 farklı eğitim yer almıştır.

3.1. Tasarım ve Yapısal Analiz Programları

Ar-Ge merkezlerinde çalışmaya başlayan yeni mühendislerin ilk yaptıkları işleri tasarım programlarını kullanmak olmaktadır. Bu nedenle iş başvurularında ilk aranan kriter bir tasarım programını kullanıp kullanamamaları olmaktadır. Tüm sektörlerde olduğu gibi otomotiv sektöründeki firmalarda da farklı tasarım programları kullanılmaktadır. Firmalar için kendi kullandıkları tasarım programını bilen adaylara öncelik verseler de bu programlarından birisinin iyi bilinmesi de işe kabulleri için yeterli olmaktadır. Çünkü iyi bir tasarım programı kullanıcısı yeni bir programa hızlı bir şekilde uyum sağlayabilecektir. Bugün otomotiv sektörün yaygın olarak kullanılan tasarım programları bazıları;

- CATIA,
- Siemens NX,
- AutoCAD,
- Solidworks.

Bu eğitim program içerisinde de belirlenen eğitim, programa destek veren firmaların bilgisayar laboratuvarlarında profesyonel eğitmenler tarafından beş gün süre ile uygulamalı olarak gerçekleştirilmiştir.

Ar-Ge mühendislerinin bir kısmı sayısal analizler konusunda çalışmak istemektedir. Bu mühendislerin bu programları detaylı bir şekilde öğrenmesi gerekmektedir. Diğer Ar-Ge mühendislerinin ise sayısal analiz programlarının başarılı bir şekilde analiz yapabilmeleri için neye ihtiyaç duyduğu, hangi analizin hangi program ile yapılabileceği, analizin ne kadar bir sürede gerçekleşeceği ve sonuçlarının nasıl okunması gerektiği bilgisine sahip olması gerekmektedir. Bugün yaygın olarak kullanılan programlardan bazıları

- ANSYS,
- MATLAB,
- ABAQUS.

Bu programların eğitimlerini veren firma personelleri tarafından katılımcılara kendi bilgisayarları üzerinden uygulamalı olarak eğitimler gerçekleştirilmiştir.

3.2. Teknik Yetkinlikler

Ar-Ge’de yapılan en önemli faaliyet ürün geliştirme faaliyetidir. Bu nedenle Ar-Ge merkezi çalışanlarının öncelikle yeni ürün geliştirme fikrinin nasıl ortaya çıkışını, fikri olgunlaştırmak için neler yapıldığını ve ürünün nasıl tanımlandığını bilmeleri gerekmektedir. Bu konuda katılımcılara yetkinlik kazandırabilmek için

- Konsept Tasarım,
- Endüstriyel Tasarım,
- Fizibilite Etütü,
- Finansçı Olmayanlar İçin Finans,
- Fikri ve Sınai Haklar,
- QFD Kalite Fonksiyonları Dağılımı,
- Tasarım Odaklı Düşünme,
- Müşteri Odaklılık
- Teknoloji Yol Haritası

eğitimleri programda yer almıştır.

Yeni ürün özellikleri belirlendikten sonra tasarım çalışmalarına başlanacaktır. Bu aşamada mühendislerin ihtiyaç duyacağı yetkinlikler için

- İmalat Teknolojileri,
- 3B Yazıcılar,
- Prototip İmalat Yöntemleri,
- Tasarım FMEA,
- Proses FMEA,
- Geometrik Toleranslandırma,
- DOE Deneysel Tasarım,
- Sac Metal Malzemeler,
- Plastik Malzemeler,
- Kompozit Malzemeler,
- Üretim Süreçleri Tasarımı,
- SPC - İstatiksel Proses Kontrol,
- Tahratsız Malzeme Muayenesi,
- Yalın Üretim
- Endüstri 4.0

eğitimlerine programda yer verilmiştir.

Ar-Ge mühendislerinin yaptığı çalışmalardan bir kısmı da mevcut ürünün iyileştirilmesi çalışmalarıdır. Bu çalışmalar konusundaki yetkinliklerini geliştirmek için

- İnovasyon,
- Problem Çözme Teknikleri
- TRIZ - Yaratıcı Problem Çözme Teknikleri

eğitimleri öngörülmüştür.

Bugün ülkemizde birçok firmada bakanlık onaylı Ar-Ge merkezleri bulunmaktadır. Bu merkezlerde çok sayıda Ar-Ge projesi yürütülmektedir. Ayrıca Ar-Ge merkezi olsun ya da olmasın Ar-Ge çalışmalarını desteklemek için birçok hibe ve fon mekanizması bulunmaktadır. Bu mekanizmalara proje yazma ihtiyacı da vardır. Bu çalışmaları desteklemek amacı ile programda

- Ar-Ge ve Tasarım Merkezleri,
- Hibe ve Fon Kaynakları,
- Proje Fikri Oluşturma,
- Proje Yazma,
- PMI Proje Yönetimi,
- Agile Proje Yönetimi

eğitimleri yer almıştır.

3.3. Davranışsal Yetkinlikler

Tüm bu teknik desteklerin yanında genç mühendislerin iş hayatında başarılı olabilmesi için davranışsal yetkinlikler konusunda da desteklenmesi gerektiği düşüncesinden hareket ile

- İletişim Teknikleri,
- Sunumda Başarı,
- Değişim
- Mühendislik Etiği

eğitimlerine programda yer verilmiştir.

Genç mühendisler için gerçekleştirilen bu programda iş arama ve bir iş yerinde çalışmak yerine kendi fikirlerini hayata geçirmek istiyorlar ise bunun için neler yapmaları gerektiği konusunda kendilerine destek olmak için

- İş Arama Becerileri (CV Hazırlama)
- Girişimcilik

eğitimleri de programa eklenmiştir.

3.4. Diğer Çalışmalar

Programa kabul edilme şartlarından birisi İngilizce dil bilgisi olarak belirlenmiştir. Başvurularda resmi yabancı dil sınavlarında alınan sonuçlar kullanılabilir. Eğer bu sınav sonuçları yok ise program çerçevesinde anlaşılan bir İngilizce kursu tarafından bir seviye tespit sınavı gerçekleştirilmiştir. Program katılım seviyesinde yabancı dil bilgisi olmasına rağmen mevcut seviyelerini arttırmak isteyen adaylara ücretsiz bir kur İngilizce eğitim desteği sağlanmıştır.

Programın düzenlendiği dönemde otomotiv sektöründe düzenlenen Sempozyum, konferans ve etkinliklere (Otomotiv Ar-Ge Proje Pazarı, Aftermarket Konferans ve Uluslararası Otomotiv Mühendisliği Konferansı) katılım sağlanarak sektördeki gelişmeleri birinci elden görmeleri ve sektör profesyonelleri ile tanışma fırsatlarının oluşturulması sağlanmıştır. Yine benzer şekilde özellikle programa destek veren firmalar olmak üzere firma ziyaretleri gerçekleştirilmiştir. Sektör temsilcileri ile bir araya gelerek sektör hakkında katılımcıların bilgi düzeyi artırılmıştır.

Program süresi boyunca en az üç kişiden oluşan gruplar oluşturulmuş ve grupların bir proje üzerine çalışmaları istenmiştir. Çalışılan projeler için mezuniyet töreni sırasında proje günleri şeklinde bir etkinlik düzenlenerek grupların hazırlamış oldukları proje posterleri üzerinden katılımcılara projelerini anlatmaları sağlanmıştır. Program çerçevesinde gerçekleştirilen projelerden bazıları;

- Yaya Koruyucu Hava Yastığı
- Taşıtlar İçin Ön Darbe Sönümleyici Geliştirilmesi
- Üretken Tasarım ile Direksiyon Aksonu Tasarımı
- Çok Amaçlı Bagaj Sehpa
- Kademeli Led Fren Lambası Tasarımı ve Arduino ile Tasarımı
- Ticari Araçlar İçin Yenilikçi Yükleme Sistemi
- Kaza Önleyici Park Sistemi
- Bir Aracın Arka Koltuğuna Entegre Edilmiş Bebek Koltuğu Tasarımı

Program eğitimleri sürecinde her hafta pazartesi günü ilk saatte tüm adayların bir hafta önceki eğitimlerde elde ettikleri bilgiler ışığında bir dakikalık sözlü sunum yapmaları istenmiştir. Sunumlar tüm adaylar tarafından oylanarak haftanın ilk üçü belirlenmiştir. Bu sayede adayların eğitimleri özümsemelerine katkı sağlamamış, bu uygulama adaylar arasındaki iletişimi de güçlendirmiştir.

Gerçekleştirilen her eğitim için eğitim ve eğitmen değerlendirme anketi yapılarak bir sonraki program için veri elde edilmeye çalışılmıştır. Yine eğitimlerin başında bir ön test ve sonunda bir ön test yaparak katılımcıların eğitimden elde ettikleri kazanımları ölçülmüştür. Programın sonunda da program değerlendirme anketi yapılarak programdaki tüm hususlar katılımcılara sunularak görüşleri alınmıştır. Bu görüşler ile bir sonraki program için iyileştirme noktaları belirlenmiştir.

4. SONUÇLAR

Programa 62 farklı üniversiteden 782 başvuru yapılmış ve başvuranlardan 289'u İngilizce seviye tespit sınavına alınmıştır. İngilizce sınav sonucu ve diğer başvuru ön koşullarını sağlayan 196 aday mülakata alınmıştır. 13 farklı firma insan kaynakları ve Ar-Ge uzman ve yöneticilerinin katılımı ile 38 adam/gün harcanarak mülakatlar tamamlanmıştır. Mülakata katılan adaylardan uygun bulunan 52 aday iki sınıf oluşturmak için seçilmiştir. Seçilen bu adaylar 13 farklı üniversiteden mezun ya da mezun olacak durumdadır. Katılım hakkı kazanan adayların 41'i yeni mezun ya da başvurunun yapılacağı yılda mezun olacak iken 11 adedi yüksek lisansa devam etmektedir. Seçilen adayların mühendislik bölümleri ise şu şekildedir; 33 Makine Mühendisi, 10 Endüstri Mühendisi, 4 Otomotiv Mühendisi, 3 Mekatronik Mühendisi, 1 İmalat Mühendisi ve 1 Raylı Sistemler Mühendisi.

50 gün süre ile devam eden programda eğitime katılım oranı %89 olarak gerçekleşmiştir. Katılım sağlanamayan günlerin büyük bir çoğunluğunda adayların final ya da bütünleme sınavları olmuştur. Adaylara katıldıkları eğitimler için eğitimi düzenleyen firmaların eğitim katılım sertifikaları ve genel olarak bu program katılım sertifikaları verilmiştir.

Programı tamamlayan adayların bir yıl sonraki çalışma durumları kontrol edildiğinde askere ya da yurt dışına giden ya da yüksek lisansa devam ettiği için iş arayışında olmayan adaylar dışında iş arayan adayların %82'si bir işe yerleşmişlerdir.

İlk yıl başarı ile tamamlanan program üç yıl boyunca farklı illerde gerçekleştirilmiş ve 200'den fazla genç mühendise yetkinlik gelişim imkânı sunmuştur.

5. REFERANSLAR

- [1] Ö.Ö.Nazan, “Türkiye Otomotiv Sektörünün Beş Güç Modeli ile Değerlendirilmesi”, Cilt: 14 Sayı: 28, Tem. 2022, s.19-27
- [2] Uludağ Otomotiv Endüstrisi İhracatçıları Birliği, “Otomotiv Sektörü, Son 19 Yılda 18. Kez İhracat Şampiyonu Olmayı Başardı”, Basın Bülteni, 6 Ocak 2025, <https://uib.org.tr/tr/otomotiv-sektoru-son-19-yilda-18kez-ihracat-sampiyonu-olmayi-basardi-1>
- [3] Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı “Ar-Ge ve Tasarım Merkezleri İstatistikleri”, Ağustos 2025, <https://agtm.sanayi.gov.tr/Agtm/FaqList>
- [4] World Economic Forum, “Future of Jobs Report 2025”, Ocak 2025, s.35

TEŞEKKÜR: Bu programın düzenlenmesini sağlayan OİB – Uludağ Otomotiv Endüstrisi İhracatçıları Birliği ve BUSİAD Bursa Sanayicileri ve İşinsanları Derneği'ne teşekkür ederiz.

OTONOM ARAÇLARIN HUKUKİ VE ETİK SORUMLULUĞU:
ETİK ÇEVRE TASARIMI OLMADAN ADİL SÜRÜŞ MÜMKÜN MÜ?

Sevda Bora Çınar¹

¹Dr. Öğr. Üyesi, Akdeniz Üniversitesi Hukuk Fakültesi, Ticaret Hukuku Anabilim Dalı, Antalya, TÜRKİYE
Tel: *** E-Posta: sevdabora@akdeniz.edu.tr / av.sevdabora@gmail.com

Özet-Otonom sürüş teknolojileri, ulaşım sistemlerinde güvenlik ve verimlilik açısından önemli bir dönüşüm vadetmektedir. Ancak bu teknolojilerin yaygınlaşmasıyla birlikte hukuk, etik ve mühendislik disiplinlerinin kesişiminde yeni tartışmalar gündeme gelmektedir. Özellikle tren problemi gibi “etik ikilem” senaryoları, karar süreçlerinde krize indirgenmiş dar bir bakış açısını yansıtmaktadır. Bu çalışmada, etik tartışmaların yalnızca yazılım algoritmalarına odaklanmasının yetersiz olduğu, etik açıdan tasarlanmamış çevresel koşulların da dikkate alınması gerektiği ileri sürülmektedir.

Yöntem olarak literatür taraması, normatif etik analizi ve düşünce deneyleri kullanılan bu çalışmada, araçların karar süreçlerinin yalnızca içsel kodlamalarla değil, aynı zamanda çevresel kısıtlarla da şekillendiği ortaya koyulmaktadır. Bu bağlamda sorumluluk, yazılımcı, üretici ve kamu otoriteleri arasında paylaştırılmalı; ayrıca mühendislik ile hukuk disiplinleri arasındaki iş birliği güçlendirilmelidir.

Sonuç olarak, otonom araçlara ilişkin düzenlemelerin yalnızca teknik yeterlilik ve kusur tespitine indirgenmemesi, sistem bütünlüğü içinde çevresel etik tasarımın da göz önünde bulundurulması gerektiği savunulmaktadır. Çalışma, etik davranışın yalnızca algoritmalara değil, araçların işlediği çevrenin hukuka ve etiğe uygun şekillendirilmesine bağlı olduğunu vurgulamakta ve disiplinler arası bir yaklaşımın zorunluluğunu ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Otonom araçlar, etik ikilem, hukuki sorumluluk, çevresel etik tasarım, metaetik.

1. GİRİŞ

Başta yapay zekâ olmak üzere bilişim alanındaki teknik ve bilimsel ilerlemeler hızla geleneksel alanları dijitalleştirme başlamakta, bu alanlara egemen olan insan iradesi ve otoritesi her geçen daha da sorgulanır hale gelmektedir [1]. Genel olarak, insan kontrolünün tamamen devre dışı

kaldığı otonomluk aşaması, geniş anlamıyla kendi kendini üreten, sürdüren, programlayan teknolojiler anlamına gelmektedir [2]. İnsanların karar süreçlerindeki otoritesini, aklının mirasçısı olarak da kabul edilebilecek akıllı sistemlere terk etmesinin gerisinde pek çok sebep bulunmaktadır. Bu sebeplerden ilki, yapay zekâ teknolojilerinin alacağı karara insanların tam olarak güven duymasıdır. İkinci sebep ise alınması gereken kararların genellikle çok veri içermesi, inceleme ve değerlendirme uzun zaman alırken, kararların hızlı bir şekilde verilmesi gereğinden doğan baskıdır [1]. Bunun yanında dikkat gerektiren iş ve görevlerin yükünü insanların üzerinden alarak, hedeflenen alana yönelik dikkatin toplanmasını amaçlayan, özellikle pazarlama alanı bakımından ciddi yatırımlar yapan şirketler de bulunmaktadır. Öyle ki Google’ın otonom araç geliştirmekteki asıl hedefinin, kullanıcılarının yola bakmak yerine ekranlara bakmasını sağlamak ve böylelikle daha çok reklam izletmek olduğu dahi ileri sürülmüştür [3]. Esasında gerçekten de tüm sosyal medya uygulamaları yöneten teknoloji şirketleri aynı amaçları taşımakta ve kullanıcıların dikkatlerini çekmek için birbirleriyle rekabet etmektedir [4]. Bu rekabetin asıl sebebi ise kullanıcılarının davranışlarının sürekli gözlemlenmesiyle elde edilen büyük verileri analiz ederek müşterilerine bir olasılık yerine kesinlik satmayı hedefleyen reklam şirketlerinin pazarlama stratejileridir [1, 4]. Sonuç olarak, uygulamadaki trendler, reklamlar ya da pozitif deneyimler neticesinde insanların kontrolü akıllı sistemlere terk etmesinin gerisinde, bu sistemlerin daha verimli, hızlı, başarılı ve üstün olduğu yönündeki algıların pekiştirilmesi yatmaktadır [5].

Yapay zekâ teknolojisi birçok otonom aracın hayata geçirilmesini sağlamış, özellikle insan bedeninin elverişsiz olduğu ya da ciddi risklerle karşı karşıya kalabileceği yeraltı, deniz, uzay gibi alanlarda otonom sistemlerin kullanılması tercihten ziyade bir zorunluluk halini almıştır [6]. Benzer şekilde insanlar için ciddi tehlike barındırmamakla birlikte dikkat ve özen gerektiren, başka bir işle ilgilenmesini engelleyen, gündelik faaliyetlere

yönelik olan işlerde de otonom sistemler kullanılmaya başlanmıştır.

Otonom araç teknolojileri, ulaşım sistemlerinde köklü bir dönüşüm vadetmektedir. Nitekim sürücüsüz araçlar, özellikle hareket kabiliyeti kısıtlı insanların günlük yaşamlarını kolaylaştırmada oldukça etkili olabilecek ve bu kişilerin trafikte etkin olarak yer almalarını sağlayabilecek potansiyeller barındırmaktadır [7, 8]. Ayrıca bu teknolojiler genel olarak ele alındığında, trafik kazalarına ve trafik kazası kaynaklı ölüm ve sakatlanmalara karşı ciddi bir önleyici imkân olarak da değerlendirilmektedir [8, 9]. Ancak insan faktörünün karar alma süreçlerinden büyük ölçüde dışlanması, güvenlik ve verimlilik açısından ciddi avantajlar sunarken; bu gelişmeler, hukuk ve etik açısından yeni tartışmaları da beraberinde getirmektedir. Bugüne kadar yapılan tartışmaların çoğu, aracın içsel yazılımına ve kriz anlarındaki kararlarına odaklanmıştır. Ancak bu dar bakış açısı, asıl sorunun çevresel ve sistemik boyutunu gölgede bırakmaktadır. Çalışmanın amacı, otonom araçların yalnızca teknik boyutunu değil, aynı zamanda çevre, hukuk ve etik bağlamında bütüncül bir şekilde değerlendirilmesini sağlamaktır. Nitekim sürücüsüz araç projesinde zor olan aracın otonom hareket ettirilmesinin sağlanması ya da iki yapay zekâ aracın birbirine zarar vermesinin önlenmesi değil, aracın kendi gibi olmayan çevreyi ve değişen koşulları algılaması ve hızla aksiyon almasının sağlanmasıdır [10].

2. OTONOM ARAÇLARIN ETİK İKİLEM SORUNSALININ TEMEL ÇERÇEVESİ

2.1. Etik İkilemler ve Tren Problemi

Karar vermedeki etik ikilemler, *tren problemi* ile özdeşleşmiştir. İlk olarak 1967 yılında Philippa Foot tarafından ileri sürülen ve sonrasında geliştirilen tren problemi, etik alanındaki düşünce deneylerinden biri olmakla birlikte, biçimi ve türü bakımından oldukça önem taşımaktadır. Nitekim süregelen felsefi tartışmalar yanında, güncel bir bilim dalı olan nöroetik açısından önemli bir deneydir. Tren probleminin ilk varyasyonuna göre, hızla giden bir tren kendi rotasında kalırsa 5 kişiyi kesinlikle ezecek, ancak makas değiştirilerek trenin rotası değiştirilirse, bu sefer diğer yoldaki bir kişiyi kesinlikle ezecektir. Bu durumda hareketsiz kalınıp beş kişinin ölümü mü izlenmeli, yoksa makas değiştirilerek, bir kişinin ölümüne sebep olunmakla birlikte diğer beş kişinin hayatı mı kurtarılmalıdır? Peki bu bir kişinin bilim insanı olması ya da beş kişinin cezaevi kaçağı olması durumunda karar nasıl verilmelidir? Bu şekilde tren problemindeki tüm parametrelerle oynanması mümkündür. İnsan açısından da tek ve kesin doğru kabul edilebilecek bir çözümü olmayan ahlaki etik problemler, otonom

araçların yükselişiyle birlikte birer mühendislik problemi halini almıştır [11]. Nitekim sürücüsüz araçlarda tren probleminin her bir varyasyonunun somut olayda gerçekleşmesi mümkün olduğuna göre, makine etiğinin sürücüsüz araçların trafiğe çıkmasından çok daha önce oluşturulması ve her bir ikileme çözüm üretilmesi ya da ikilemde bırakmayacak ek sistem ve düzenlemelerin yapılması gerekmektedir. Ancak etik ikilem senaryoları, otonom araçların kriz anlarındaki davranışlarını sorgulamak için sıkça kullanılmakla birlikte, bu senaryolar, kararların yalnızca yazılıma bağlı olduğu varsayımıyla sınırlı kalmaktadır. Oysa gerçek dünyada kazaların çoğu, yalnızca sürücünün ya da somut olayda yazılımın yetersizliğinden değil, altyapı eksikliklerinden veya hukuki düzenlemelerin zayıflığından da kaynaklanabilmektedir.

2.2. Çevresel Faktörlerin İhmal Edilmesi

Varlığı zeki yapan bir bakıma çevresiyle etkileşime girebilmesi, çevresindeki varlıklardan öğrenebilmesi ve bu etkileşimi otonom olarak gerçekleştirebilmesidir [12, 13]. Trafik çok güçlü algılayıcıları ve sezgileri olan insanlar için bile oldukça karmaşık ve hızlı refleks gösterilmesi gereken tehlikelerle dolu sosyal bir alandır. Tüm trafik işaretleri, yayalar, hava durumu, zemin durumu, anlık gelişen ve ikilemde bırakan karar anları, makineler açısından insanlar için olduğundan çok daha zorlayıcıdır. Tüm bu zorlukların aşılması için öncelikle güçlü bir görsel tanıma yetkinliği ve ahlaki ikilemlere dair güçlü bir etik standardının belirlenmesi gerekmektedir. Bu sebeple sürücüsüz araçları sosyal bir alan olan trafikte normalleştirmek için bilgisayarlı görü, görüntü ve ses tanıma, işleme ve tüm verileri sentezleyerek bir çıkarım elde edilmesini sağlayacak şekilde yapay zekânın pek çok alanının birleştirilerek sürecin mükemmelleştirilmesinin sağlanması şarttır.

Aslında Turing testlerinin, günümüzde kullanılan “görseller arasında istenileni bulma” şeklindeki standart sorularında, tam olarak bu sebeple taşıtlar, yaya geçitleri, trafik ışıkları ve bisikletler gibi trafiğe ilişkin görseller kullanılmaktadır. Diğer bir deyişle teknoloji kullanıcıları farkında bile olmadan trafiğin yeni katılımcısı olacak makinelerin görsel zekâsının veri tabanının oluşturulmasına katkı sunmaktadır. Teknolojik alt yapının sağlanmasıyla, trafik alanı sürücüsüz araçlara hazır olsa bile bu teknolojinin uygulamaya geçirilmesi için hükümetler, endüstri ve tüketicilerin iş birliği içinde olmaları ve bu uygulamanın hukuka olan olası etkileri üzerinde gerekli kararların alınmış olması gerekecektir. Bunun gerçekleşmesi varsayımında bu projenin, ulaşımına dair ezberleri kökten değiştirebilecek nitelikte güçlü bir proje olacağı

ortadadır. Öyle ki 2030 yılında sadece Amerika’da muhtemelen 20 milyona yakın otonom aracın trafikte olacağı tahmin edilmektedir [14].

Otonom bir aracı kullanmaya karar vermek, bu aracı işlevsel ve tercih edilebilir kılan devasa bir işletim ağına entegre olarak çalıştırılmasını sağlamayı da kabul etmek anlamına gelmektedir. Bu ağın hukuki, etik, ekonomik, felsefi, sosyal, kültürel, psikolojik, politik pek çok bileşeni de bulunmak zorundadır. Dolayısıyla otonom araçlara uyumlu ve uygun bir trafik ekosisteminin inşası şart olduğu gibi aynı zamanda kaçınılmazdır. Nitekim tren problemindeki temel problem, problemin ele alındığı çevre tasarımıyla kaynaklanmaktadır. Trenin kesinlikle çarpacağı bir varyasyonun temel bileşenleri, trenin çarpmasına imkân verecek bir çevre tasarımıyla çıplak raylar üzerinden hareket ettirilmesi, bu rayların inşasından başlanmak üzere çevre, hayvan, insan ve doğal ekosistemin göz ardı edilerek paydaşlara zarar verilmesi, sistem işletilirken de bu zararın sürdürülmesine razı olunması yatmaktadır. Elbette bunun temel nedeni, ulaşımın sağlanması, can ve mal güvenliğinin temini, tüm paydaşlar bakımından en önemli hukuki ve vicdani değer olan yaşama hakkının ticari ilkelere biri olan daha ucuza mâl etme ve karı artırma öncülü karşısında ikinci plana itilmesidir. Bu stratejinin trafik kazaları, insan ve hayvan ölümleri, ulaşım ağları inşasındaki çevre katliamları ve ek olarak araçların karbon salınımı ve sistem sürdürülebilirliğinin fosil yakıtlara dayalı oluşunun verdiği zararlarla değerlendirildiğinde faydadan çok zarar getiren bir strateji olduğu ileri sürülebilmektedir [15].

Dolayısıyla tüm göz ardı edilen değerler yanında, şerit çizgilerinin belirsizliği, trafik ışıklarının yetersizliği ya da denetim eksikliği, insan sürücülerde olduğu gibi otonom araçların da “yanlış karar” vermesine yol açabilmektedir. Çevresel sorunların çözülmesi için de trafik yoğunluğunun denetlenmesi, otoyolda sürüş güvenliğinin artırılması, trafik ışıklarında bekleme sürelerinin trafik yoğunluğuna göre senkronize edilmesi gibi birçok alanda yapay zekâ teknolojileri etkili bir şekilde kullanılmaya başlanmaktadır. Ancak araçlardaki ilerleme düşünüldüğünde uzay çağında olursa da bu araçların kullanmak zorunda bırakıldığı kara yolları Antik roma yolları seviyesinde kalmaktadır [16]. Bu noktada sorulması gereken temel soru şudur: Etik açıdan sorunlu ve yetersiz bir çevrede, herhangi bir yazılımın gerçekten etik davranması mümkün müdür?

Kanaatimizce otonom araçların etik ikilem problemlerini çözmeye odaklanmak yerine-ki bu mesele insan sürücüler bakımından da henüz çözülebilmemiş değildir- araçları etik ikilem içine sokmayacak bir ulaşım ağı üzerinde düşünmek daha

faydalı olacaktır. Nitekim sürücüsüz araç araştırmaları devam ederken bu araçların diğer varlıklarla etkileşime giremeyeceği ya da zarar veremeyeceği ve aynı şekilde zarar göremeyeceği, bu sistemlere özgülenmiş yollar yapılması daha basit ve etkili bir çözüm olarak görünmektedir. Gerçekten de klasik ulaşım ağının dijital versiyonunun inşası, geleneksel zararların tümünü bertaraf edebilecek potansiyeller taşımaktadır. Böyle bir ekosistemin inşasının başlangıçta oldukça yüksek bir maliyet taşıyacağı düşünülse de bu teknolojilerin yaygınlaşmasıyla birlikte sistemin işletim ve sürdürülebilirlik maliyetinin düşmeye, verimliliğinin ise artmaya meyilli olacağını öngörmek mümkündür [17, 18, 19]. Nitekim başlangıçta otonom araçlar için geliştirilen ancak sonrasında klasik araçlar için de kullanılması mümkün olan Boring şirketinin yüksek hızlı tüneller projesi kapsamında tünelin 1.6 km’lik kısmının 10 milyon dolara mal olduğu, tünelin geleneksel yöntemle inşa edilmiş olması halinde ise 1 milyar dolara mal olabileceği açıklanmıştır [20]. Ulaşım araçlarındaki hızlı gelişim düşünüldüğünde yola bağımlılığın da azaldığı hem kara hem hava hem de suda hareket edebilen her koşula uyum sağlayan araçların üretilmesi de imkân dahilindedir [16]. Bunun yanında, teknoloji geliştirildikçe, yalnızca ulaşım ağı bakımından değil bu ağ üzerindeki araçların da tasarıma dair karmaşıklığı hızla azaltılmakta, aynı işi yapabilen binlerce parça yerine tek bir bütün geliştirilmesi sağlanabilmekte ve benzer şekilde devasa bir sistem de eş güdümlü olarak tek bir parça gibi işletilebilmektedir [21]. Dolayısıyla iki insan sürücüye nazaran birbiriyle iletişim kurabilen ve tek bir ekosistem içinde yer alarak ortak hareket etmesi mümkün olan yapay zekâ otonom araçların birbirine çarpma ihtimali mevcut duruma nazaran çok daha düşük olacaktır [11]. Nesnelerin interneti ve yapay zekâ ile güçlendirilmiş otonom araçların, otonom bir ulaşım ağı içerisinde yer alarak, gelecekte insanların yaşam standardını ileri düzeylere taşıyabileceği ortadadır [22].

3. LİTERATÜRDEKİ TARTIŞMALARIN HUKUKİ, ETİK VE DİSİPLİNLERARASI BOYUTLARIYLA DEĞERLENDİRİLMESİ

3.1. Hukuki Boyut

Otonom araçlarla ilgili en temel meselelerden biri sorumluluğun kimde olduğu sorusudur. Kazalarda kusurun yazılımcıya mı, üreticiye mi, yoksa kamu otoritelerine mi ait olduğu çoğu zaman belirsizdir. Mevcut hukuk düzeni, genellikle öngörülebilirlik ve kusur kavramları üzerine kuruludur; ancak yapay zekâ destekli araçlarda bu kavramların yeniden tanımlanması gerekmektedir. Ayrıca, yalnızca kaza sonrası kusur tespitine odaklanan mevcut paradigmlar, önleyici düzenlemeler açısından

yetersiz kalmaktadır. Hukukun rolü, yalnızca kaza sonrası telafi odaklı adalet dağıtımını değil, aynı zamanda riskleri azaltıcı önleyici düzenlemeleri de içermelidir.

Yapay zekâ teknolojilerinde hukuka uygun sistemlerin geliştirilmesinde en büyük sorumluluk bu alanda çalışan bilim insanlarına düşmektedir. Hukuk alanında da bilişim alanında çalışanların etik, hukuki ve mesleki yükümlülüklerini düzenleyerek belirsiz bir alan bırakmaması gerekmektedir. Hukukun geriden gelmesi uygulamadaki belirsizlikleri endişe kaynağı haline getirir de uluslararası alanda yapılan pek çok çalışma bulunmaktadır. Örneğin Avrupa Konseyi, birlik pazarına sunulacak bir yapay zekâ teknolojisi için öncelikle güvenilirlik testinden geçirilmesi, uygunluk denetiminden ve belirli gereksinimlerin sağlanmasından sonra kullanımına izin verilmesi gibi yasal düzenlemeler üzerinde çalışmaktadır [23].

Teknoloji kullanıcıları bakımından, uygulamadaki belirsizlikleri ve tereddütleri giderebilecek en önemli sistem özelliği, üst kontrolün kullanıcıya özgülendiğini garanti eden mekanizmalarla sistemin desteklenmesidir. Özellikle otonom bir sistem karşısında, insan üstünlüğünün yegâne göstergesi sistemi kapatma imkanını elde bulundurmaktır [8]. Dolayısıyla teknolojinin faydalarını artıracak sistemler kadar olası zararlarını önleyici, düzeltici ve koruyucu sistemlerin de tasarlanması, bilişim alanının sürdürülebilirliği ve güvenliği için şarttır.

Yapay zekâ sistemlerinin otonomlaşması, süreçteki insan kontrolünün azalarak geri plana itilmesi, ticari sır, patent koruması gibi gerekçelerle sistem kararlarının oluşturulma süreçlerinin takip edilemez ve incelenemez oluşu, bu tür sistemlerin kararlarının hatalı olup olmadığından, olası bir hata halinde kimlerin hangi sorumluluk bağlarıyla sorumlu tutulabileceğine kadar alışılmış sorumluluk hukukunun oldukça yabancı olduğu bulanık alanlar yaratmaktadır. Sorumluluk sisteminde zararın öngörülebilir olup olmadığı, meydana gelen zararda kusur olup olmadığı gibi pek çok alışılmış sorumluluk bağları, konu özellikle otonom yapay zekâ sistemleri olduğunda sorumluluğun kurulabilmesi için yetersiz kalmaktadır [7, 24]. Güncel koşullar altında yapay zekâ teknolojilerinin sigorta hukukuyla desteklenmesi en işlevsel çözümlerden biri olarak değerlendirilmektedir. Özellikle otonom araçlar için geliştirilen “kara kutu sigortası (black box insurance)” gibi poliçe tasarımlarıyla hem daha en başından yapay zekâ sisteminin işleyiş sürecindeki dijital izlerin kayıt altına alınması sağlanmakta hem de teknik sürecin anlaşılabilirliği ve belirsizliğinin giderilmesi açısından kara kutunun teknik incelenmesi pek çok ihtilafı giderebilmektedir [25]. Bu noktada

başlangıç olarak, otonom araçlara özgü yeni bir sigorta alanının inşa edilmesi ve motorlu taşıtların sigortalanmasında olduğu gibi asgari sorumluluğu güvence altına alan zorunlu poliçelerden, her türlü olasılığın değerlendirileceği kapsamlı ihtiyari poliçelere kadar benzer bir sigorta sistemi oluşturulması faydalı olacaktır [7, 26].

3.2. Etik Boyut

Bilişim etiği, teknolojik gelişmelerle birlikte gelişimini sürdürerek yalnızca bugünün değil geleceğin de önemli bir çalışma alanı olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu çerçevede tasarımcı etiği, yapay zekâ sistemlerinin üreticisi, tasarımcısı, yazılımcısı ve onun çalışmasında yol ve yöntemleri belirleyecek olan her yetkilinin makine etiğine ilişkin belli başlı yasaları makinelere kodlaması ya da öğretmesi yükümlülüğünü taşımaları anlamına gelmektedir. Otonom araçların önemli bir bileşeni olan yapay zekâ teknolojileri alanında ise bir yandan yapay zekâ sistemlerinin geliştirilmesi ve kullanımında etik ilkelerin belirlenmesi ve uygulanması hedeflenirken, diğer yandan bu sistemlerin etik hareket edebilmesi ve etik olanı uygulayabilmesi, yani makine etiği olarak adlandırılan bir alan da tartışmaya açılmıştır [27].

İnsanın yerini alabilecek ve kimi zaman insanı tamamen devreden çıkaracak sistemlerin, dönüştürdükleri meslek gruplarının etik ve insani yönlerini de karşılaması gerekip gerekmediği meselesi etiğin yeni bir boyutu olarak ortaya çıkmaktadır [28]. Dolayısıyla mühendislerin, sistemlerin yalnızca teknik olarak başarılı olmasını değil, aynı zamanda etik ve toplumsal etkilerini de dikkate alarak tasarlamaları sağlanmalıdır [29, 30]. Bu gereklilik, hukuki süreçlerin etik çerçevede ele alınmasının, yalnızca hukuka uygunlukla sınırlı kalmayıp aynı zamanda sürecin insani boyutlarını da kapsayacak şekilde değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir [30, 31]. Bir makinenin hangi koşullar altında nasıl davranması gerektiğine dair temel yasaları oluşturma çabası, esasında makinelere etik değerler kazandırma girişimidir. Nitekim Spinoza'nın da vurguladığı gibi insanlarla ortak özellik taşıyan sistemler insanlık için kötü olamaz, ancak insan doğasına aykırı olduğu ölçüde insanlık için kötü olacaktır [32]. Elbette ki insan doğasına uygun etik kuralların uygulanabilirliği, öncesinde programcıların bu kuralları uygulamayı istemesi, kuralların yapay zekâ sistem algoritmalarına işlenebilir olması ve yapay zekâ sistemin de özerk olarak bu sınırların dışına çıkmasının mümkün olamaması ön gereksinimlerinin karşılandığını kabul etmeyi gerektirmektedir [33].

Özellikle kritik alanlarda, hukuka uygunluk yanında yapay zekânın etik ilkelere de uygunluğunun

sağlanıp sağlanamayacağı ve bu ilkelerin teknolojik sistemlere aktarımının mümkün olup olmadığı önemli bir belirsizlik kaynağı olarak ortaya çıkmaktadır [34]. Diğer yandan, alan gelişme aşamasındayken etik kuralları ve standartları belirlemek, kurallar koyarak daha en başından sınırları çizmek ve olası riskleri henüz gerçekleşmeden önüne geçmek kritik önemdedir [10]. Bu kuralların belirlenmesi de tek başına yeterli olmayacak, yerine getirilip getirilmediğinin de kontrol edilmesi, ancak gerekli uyum testleri başarıyla tamamlandıktan sonra bu otonom sistemlerin çevreyle etkileşimde bulunmasına izin verilmesi gerekecektir. Ancak bunun yanında matematiksel açıdan hesaplamanın kendi doğasından kaynaklı olarak tüm kurallara uyumlu şekilde mükemmel bir sınırlandırma ya da otokontrol algoritmasının geliştirilmesinin mümkün olmadığı da düşünülmektedir [33].

Bir an için makinelerle etiği kodlamanın ve bu yönde hareket etmelerinin sağlanmasının matematiksel olarak mümkün olduğu düşünülürse, insanda yapılması gereken ancak yapılamayan tüm önleyici mekanizmaların makinelerde bir şekilde oluşturulması ve takip edilmesi hem daha kolay hem de daha akıllıca olmalıdır. Neticede bir kez sistem ortaya çıkıp etkileşim gösterdikten sonra onu hukuk çemberi içinde tutmaya çalışmak, henüz çevreyle etkileşimde bulunmadığı ve yaratımı devam ettiği süreçte hukuka uygun ve çevreye uyumlu olarak yaratılmasını sağlamaya nazaran çok daha zor olacaktır. Zaten teknoloji üreticileri de bunun farkında olduklarından, çevrenin korunması konusundaki müşteri hassasiyetlerinin yükselmesi ve kalite konusunda rekabetin tırmanışa geçmesi sebebiyle, ürünün işe yaraması kadar güvenli kullanımı, kullanıcı ve çevre dostu olması, enerji tasarrufu sağlaması gibi etkenler üzerinde çalışılan kalite ve kontrol süreçleri de üretimin doğal bir parçası haline gelmiştir.

Her ne kadar özellikle otonom araçların yükselişiyle ahlaki etik problemi bir mühendislik problemi halini almış olsa da son karar mühendislere bırakılamayacak kadar karma bir yaklaşım gerektirmektedir [11]. Neticede etik konusunda karar verme yetkisinin üretici ya da tasarımcıya bırakılması, özellikle ticari kaygı taşıyan geliştirmelerde kullanıcının menfaatinin üstün tutulmasıyla sonuçlanacaktır. Dolayısıyla etik ilkelerin ortak bir iradeyle oluşturulması hem demokrasi ve insan hakları bağlamında doğru bir yöntem oluşturacak, hem sorumluluk düzenlemelerinin uygulanmasında, sorumluluk sırası ve yoğunluğunun tespitini kolaylaştıracak ve hem de kişiselleştirilebilir teknolojiler yaratılmasıyla alanın gelişimini hızlandıracaktır. Örneğin kişiselleştirilebilir ayarlarla kullanıcının sorumluluğu taşımasını sağlayacak ön kararlarının

sisteme tanıtılmasının sağlanması [11] ya da bu nitelikli kararları sağlıklı alabilmesini temin edecek hukuki ve etik donanımı almasına yönelik eğitimin getirilmesinin gerekmesi [35] gibi pek çok yöntem geliştirilmesi mümkündür. Dolayısıyla, sorumluluğun sınırları; sistemin seçim yapmaya izin verip vermemesi, kullanıcı ayarlarının işlevsel olup olmaması ve mühendisler ile sağlayıcıların robotik kurallara riayet edip etmemeleri gibi etkenlere göre şekillenmekte ya da zayıflamaktadır [36]. Tüm bu hususlar ileri düzey teknik bilgi gerektirdiğinden, asli sorumluluk sistem mühendisleri ile teknoloji şirketlerine yüklenmekte; bu paydaşlar, teknolojik sistemlerin işletildiği alanın risk ve maliyetlerini gözeterek en uygun dengeyi sağlayacak bir sistem mimarisi kurmakla yükümlü kabul edilmektedir [25].

Bunun yanı sıra, yeni teknolojilerin benimsenebilmesi için üreticilerin ürünlerine duydukları güveni kullanıcıya gösterebilmeleri zorunludur. Bu bağlamda, uygulamada üreticilerin belirli garantiler sunmaları gerekebileceği gibi, söz konusu teknolojileri kullanacak şirketlerin de yeterli hukuki koruma sağlanmadıkça böyle bir riski üstlenmeyecekleri dikkate alınmalıdır. Basiretli davranma yükümlülüğü altındaki karar vericilerin yönettiği bir piyasa, risklerle birlikte kendi koruma mekanizmalarını da geliştirmek zorunda kalacaktır [25]. Benzer biçimde, bu alanı düzenleyecek hukuki normların da alanın gelişimini sağlamakla birlikte menfaat sahiplerinin çıkarlarını da gözeterek hazırlanması zorunludur [8]. Aksi takdirde ne teknoloji geliştiricileri ne de bu sistemleri iş süreçlerine entegre etmeyi planlayanlar, teknoloji pazarının geliştirilmesi ve büyümesi konusunda yeterli isteği göstermeyecektir.

Etik açıdan bakıldığında, yazılım algoritmalarının ötesine geçen bir sorumluluk da söz konusudur. Araçların kararları, yalnızca içsel kodlamalara değil, onları kuşatan çevrenin etik tasarımına da bağlıdır. Şehir planlaması, altyapı güvenliği ve trafik mühendisliği eksiklikleri, çoğu krizin doğrudan kaynağıdır. Bu bağlamda, “ahlaki pusulanın” yalnızca algoritmalar üzerinden değil, sistemin bütün bileşenleri üzerinden çizilmesi gerekmektedir. Kriz anlarının önlenebilirliği, etik sorumluluğu çevresel tasarıma kaydırmaktadır.

Tüm belirsizliklere ve etiğin değişkenliğine rağmen yapay zekâ teknolojilerinin etiğe uygun kullanımını sağlamaya yönelik Avrupa Etik Uygunluk Sertifikası gibi uluslararası etik çerçevelerin kabulüne yönelik girişimler de bulunmaktadır [8]. Özellikle *yüksek riskli sektörler ve kullanım alanları* için geliştirilen yapay zekâ teknolojilerine yönelik bir etik çerçevesi oluşturmayı hedefleyen

pek çok benzer sertifikasyon ve düzenleme yapılacağı düşünülmektedir.

3.3. Disiplinlerarası Boyut

Hukukî ve etik temellere dayanan kararlar yalnızca mevcut koşulların ürünü olarak ortaya çıkmamaktadır. Bu kararların gerisinde, geçmişten gelen eğitim, kültür, ahlak, etik değerler ve toplumsal ağların etkisi bulunmaktadır. Bu nedenle, insanın karar verme yetisini dijital uygulamalara aktarması, tarihsel süreçte inşa edilmiş karar ağlarının yeniden kurgulanması anlamına gelmektedir. Kararların niteliğini belirleyen ise çok sayıda paradigma ve etkenin bir araya getirilmesiyle oluşturulmuş sofistike bir yaklaşımdır.

Bir ulaşım ağında doğru kararın ne olduğu ve bu kararın kimin verdiği meselesi sanıldığı kadar açık ve basit değildir. Otomobil üreticileri, sürücüler, trafik polisleri, hükümetler, mahkemeler ulaşım ekosisteminin karar verici paydaşları olarak değerlendirilse de yolun çökmesi, sel, deprem, kar gibi doğanın müdahaleleri halinde en mükemmel sistem dahi anında iflas edebilmektedir. Dolayısıyla insan egemen mevcut ulaşım ağında da insanın sanıldığı kadar kontrol sahibi olamadığı görülmektedir. Muhtemelen yapay zekâ teknolojileriyle donatılmış araçların tercihi neticesinde şekillenecek çok daha kaotik bir sistem üzerinde de insanın sanıldığı kadar hükmedici konumunda olamayacağı gerçeğiyle yüzleşmek gerekmektedir [2].

Otonom araçların başarısı, yalnızca mühendislerin teknik kabiliyetine değil, aynı zamanda hukukçularla ve ilgili kamu otoriteleriyle kuracakları iş birliğine de bağlıdır. Mühendisler, tasarım aşamasında etik ve hukuki sorumlulukları da göz önünde bulundurmalı; hukukçular ise teknik süreçleri anlayarak düzenlemeleri buna göre geliştirmelidir. Bu noktada eğitim kritik öneme sahiptir: mühendislik programlarına hukuk ve etik derslerinin eklenmesi, hukuk fakültelerinde ise bilişim hukuku başta olmak üzere hukuk ve teknoloji kesişimindeki alanlara yönelik ders müfredatının geliştirilmesi gerekmektedir.

5. SONUÇ

Otonom araçların gelişimi, yalnızca teknik bir yenilik değil, aynı zamanda hukuk, etik ve toplumsal düzen bakımından da köklü bir dönüşüm alanı olarak ortaya çıkmaktadır. Bu çalışmada ulaşılan temel sonuç, adil ve güvenli bir sürüşün yalnızca yazılımın karar mekanizmalarına bırakılmayacağı, bu sistemlerin içinde bulunduğu çevrenin de etik ve hukuki ilkeler ışığında tasarlanması gerektiğidir. Nitekim tren problemi

gibi düşünce deneyleri kriz anlarını tartışmaya açsa da gerçek dünyada krizlerin büyük bir kısmı çevresel ve sistemsal eksikliklerden doğmakta, algoritmaların ötesinde bir sorun alanını görünür kılmaktadır. Bu nedenle sorumluluk, yazılımcılar, üreticiler ve kamu otoriteleri arasında paylaştırılmalı; hukuki düzenlemeler yalnızca kaza sonrası telafiye değil, aynı zamanda önleyici tedbirlerin hayata geçirilmesine de odaklanmalıdır.

Etik davranış yalnızca algoritmaların kodlarına değil, onları çevreleyen sistemin değerlerine de bağlıdır. Dolayısıyla, otonom araçların başarısı, mühendislik kabiliyetleri kadar hukukçularla, kamu otoriteleriyle ve toplumun diğer paydaşlarıyla kurulacak iş birliğine de dayanmaktadır. Bu bağlamda disiplinlerarası yaklaşım, teknik, hukuki ve etik standartların birlikte geliştirilmesi için zorunlu görülmektedir.

Sonuç olarak, otonom araç teknolojilerinin yalnızca hız, verimlilik ve ticari potansiyel açısından değil; toplumun güvenliği, adalet anlayışı ve etik değerleri bakımından da kapsamlı biçimde ele alınması gerektiği açıktır. Hukukî sorumluluk değerlendirmeleri yapılırken, sistem bütünlüğü içinde çevrenin etik tasarımının da dikkate alınması gerekmektedir. Bu bağlamda mühendis-hukukçu iş birliği, sürdürülebilir ve adil ulaşım sistemlerinin kurulmasının ön koşulu olarak değerlendirilmektedir.

6. REFERANSLAR

- [1] S. Bora Çınar, “Şirketler Hukukunun Geleceği Üzerine Bir İnceleme: Şirket Yönetiminde Yapay Zekâ”, Seçkin Yayıncılık, Ankara, 2022, s. 31, 46, 73
- [2] L. Winner, “Autonomous Technology”, The MIT Press, 1978, s. 173 ve s. 238.
- [3] İ.H. Aydın, C. H. Değirmenci, “Yapay Zekâ” Girdap Kitap, 2018, s. 76.
- [4] J. Orłowski-Yang, “The Social Dilemma”, 2020, <https://www.imdb.com/title/tt11464826/>, dk. 13.29 vd.
- [5] A. Rao, “AI: Everywhere and Nowhere (Part 3)”, 8 June 2016, <https://www.insurancethoughtleadership.com/ai-everywhere-and-nowhere-part-3/>, s. 1.
- [6] S. Bora Çınar, Yapay Zekâ ve Hukuk, Seçkin Yayıncılık, 2025, s. 231.
- [7] European Parliament, “Civil Law Rules on Robotics (European Parliament resolution of 16 February 2017 with recommendations to the Commission on Civil Law Rules on Robotics (2015/2103(INL)))”, https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-8-2017-0051_EN.html, N. 29
- [8] European Parliament, “A framework of ethical aspects of artificial intelligence, robotics and related Technologies (European Parliament

- Resolution of 20 October 2020 on a framework of ethical aspects of artificial intelligence, robotics and related Technologies 2020/2012(INL))”,
https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-9-2020-0275_EN.pdf, N. 48-50.
- [9] H. Lipson, M. Kurman, “Driverless: Intelligent Cars and the Road Ahead”, MIT Press, 2016.
- [10] J. Kaplan, “Artificial Intelligence”, Oxford University Press, 2016, s. 41 ve 107.
- [11] Y. N. Harari, “21. Yüzyıl İçin 21 Ders”, Çev. Selin Sıral, Kolektif Kitap, 2018, s. 37, 69 ve 71.
- [12] B. Goertzel, C. Pennachin (eds), “Artificial General Intelligence”, Springer, 2007, s. 8.
- [13] P. W. Taylor, “Respect for Nature”, Princeton University Press, 1989, s. 90.
- [14] M. Aroyo, Eğlenceli Tarih Dersleri: Robotlar, 2020, <https://www.imdb.com/title/tt11958648/>, dk. 17:21 vd.
- [15] H. Ünder, “Çevre Felsefesi: Etik ve Metafizik Görüşler”, Doruk Yayıncılık, Ankara, 1996, s. 108 vd.
- [16] J.H. Holland, “Bizi Bekleyen Gelişmeler ve Bunları Tahmin Etme Yolu”, Gelecek 50 Yıl: 21. Yüzyılın İlk Yarısında Hayat ve Bilim, John Brockman (ed.), Nurettin Elhüseyni (Çev.), NTC Yayınları, 2007, ss. 191-204.
- [17] C. Babbage, “On the Economy of Machinery and Manufactures”, Cambridge University Press, 2009, s. 280 vd.
- [18] K. Marks, “Kapital: Ekonomi Politikin Eleştirisi”, çev. Alaattin Bilgi, C. I, 2. Baskı, Eriş Yayınları, 2012, s. 96.
- [19] H. Moravec, “MIND Children: The Future of Robot and Human Intelligence”, Harvard University Press, 1988, s. 23.
- [20] BBC, “Elon Musk, yüksek hızlı araç tüneline tanıtı” 19 Aralık 2018, <https://www.bbc.com/turkce/haberler-46623462>
- [21] A. Toffler, “Üçüncü Dalga”, çev. Selim Yeniçeri, Koridor Yayıncılık, 2008, s. 236.
- [22] E. Aydemir, “Weka ile Yapay Zekâ”, Güncellenmiş 2. Baskı, Seçkin Yayıncılık, Ankara, 2019, s. 32.
- [23] 2021/0106(COD) Artificial Intelligence Act (Awaiting committee decision), [https://www.europarl.europa.eu/RegData/docs_autres_institutions/commission_europeenne/com/2021/0206/COM_COM\(2021\)0206_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/docs_autres_institutions/commission_europeenne/com/2021/0206/COM_COM(2021)0206_EN.pdf)
- [24] “White Paper on Artificial Intelligence - A European approach to excellence and trust, COM(2020)”, 65 final, 2020, s. 13, https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/com_mission-white-paper-artificial-intelligence-feb2020_en.pdf
- [25] H. Eidenmüller, “The Rise of Robots and the Law of Humans”, (Zeitschrift für Europäisches Privatrecht (ZEuP), C. 25, 2017, ss. 765-775) Oxford Legal Studies Research Paper No. 27/2017, s. 10.
- [26] L. Solum, “Legal Personhood for Artificial Intelligence”, North Carolina Law Review, C. 70, 1992, ss. 1231-1287.
- [27] A. F. T. Winfield, K. Michael, J. Pitt, V. Evers, “Machine Ethics: The Design and Governance of Ethical AI and Autonomous Systems”. Proceedings of the IEEE, 107(3), 2019, ss. 509-517.
- [28] P. Boddington, “Towards a Code of Ethics for Artificial Intelligence”, Springer, 2017.
- [29] M. Flanagan, D. Howeand, H. Nissenbaum, “Embodying values in technology: Theory and practice”. In M. J. van den Joven and J. Weckert (eds.), Information Technology and Moral Philosophy. Cambridge University Press. 2008, pp. 322--353.
- [30] Z. Şen, “Mühendislikte Felsefe, Mantık ve Etik, Tübitak Popüler Bilim Yayınları, 2015, s. 200.
- [31] M. Coeckelbergh, “AI Ethics”, MIT Press. 2020.
- [32] Spinoza, “Ethica”, çev. Ç. Dürüşken, Alfa, 2019, s. 345.
- [33] M. Alfonseca, M. Cebrian, A. F. Anta, L. Coviello, A. Abeliuk, I. Rahwan, “Superintelligence Cannot be Contained: Lessons from Computability Theory”, Journal of Artificial Intelligence Research, C. 70, 2021, ss. 65-76.
- [34] L. Floridi, J. Cowls, “A Unified Framework of Five Principles for AI in Society”, Harvard Data Science Review, 1(1), 2019.
- [35] A. Etzioni, O. Etzioni, “AI Assisted Ethics”, Ethics and Information Technology, C. 18, S. 2, 2016, ss. 149-156.
- [36] D. Solinger, P. Ehlert, L. Rothkrantz, “Creating a dogfight agent”, Technical Report DKS05-01/ICE 10, 2004, <http://www.kbs.twi.tudelft.nl/>

OTONOM SÜRÜŞ SİSTEMLERİ İÇİN BİR ÖNERİ: TRAFİK İŞARETLERİNİN OTOMATİZASYONU

Yasemin YILMAZOĞLU¹, Prof. Dr. Ufuk SAKARYA²

¹Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Recep Tayyip Erdoğan Külliyesi Maltepe Yerleşkesi, Aydınevler Mah. İdealtepe Yolu No:15 34854 Maltepe/İstanbul, TÜRKİYE
Tel: 552 267 60 62 E-Posta: yasemin.yilmazoglu@marmara.edu.tr

²Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü, Davutpaşa Yerleşkesi, 34220, Esenler / İstanbul, TÜRKİYE
Tel: 532 584 97 62 E-Posta: usakarya@yildiz.edu.tr

Özet- Elektrikli ve hibrit araçlardaki gelişmeler, otonom sürüş teknolojilerinin yaygınlaşmasını hızlandırmıştır. Sensörler, yapay zekâ ve V2X tabanlı iletişim sistemleriyle desteklenen araçlar, güvenliği artırmakta ve trafik akışını iyileştirmektedir. Adaptif hız sabitleyici, şerit takip asistanı ve çevre algılama sistemleri bu ilerlemelere örnektir. Bununla birlikte, özellikle yüksek hızlarda trafik levhalarının doğru algılanmasına yönelik çözümler henüz çeşitlenmemiştir. Bu çalışmada, bulanık görüntü koşullarında dahi levhaları tanıyabilen ve aracın otonom karar mekanizmalarını yönlendirebilen bir sistem önerilmektedir.

Anahtar kelimeler: otonom sürüş, robotik U dili, trafik levhaları, QR kod, bulanıklık analizi

1. GİRİŞ

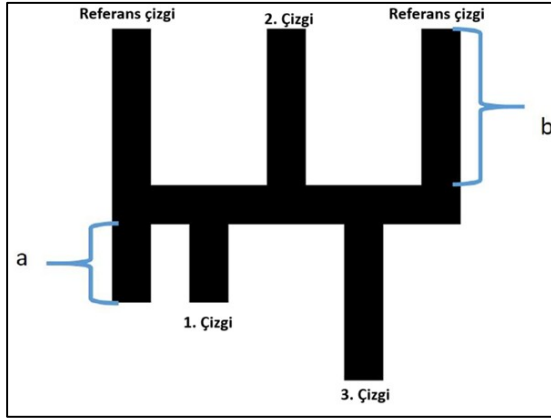
Günümüzde otonom ve ileri sürücü destek sistemlerine sahip araçlarda, trafik işaretlerinin doğru ve anlık olarak tanımlanması, trafik kurallarına uyumun sağlanması ve olası kazaların önlenmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Görüntü işleme ve yapay zekâ tabanlı sistemlerin entegrasyonu sayesinde, bu işaretlerin algılanması daha hızlı ve güvenilir bir şekilde kısmen gerçekleştirilebilmekte, bu da hem sürücülere hem de araç sistemlerine daha etkin karar destekleri sunmaktadır. Bunun yanında görsel tabanlı TSDR sistemleri büyük gelişim gösterirken derin öğrenme tekniklerinin entegrasyonu ile doğruluk oranları da artmaktadır [1]. Ancak yine de yapılan çalışmaların çoğunluğu halihazırda ülkelerde kullanılan trafik işaretlerinin görüntü işleme metotları ile algılanmasına odaklanmakta; bu işaretlerin evrensel hâle getirildikten sonra ortak bir dilde işlenip otomatik algılama metotlarıyla kullanımına dikkat çekmemektedir. Bu eksikliği gidermek amacıyla yapılan çalışmalardan birinde otomatik sürüş sistemlerine yönelik yeni nesil trafik levhaları geliştirilerek hem insanlar hem makineler tarafından okunabilen görünmez 2D barkodlarla

desteklenmiş levhalar sunmak amaçlanmıştır [2]. Ancak bu çözüm hem standardizasyon hem de yeni altyapı gerektirmektedir. Bir diğer çalışmada gelişmiş sürücü destek sistemlerine (ADAS) entegre edilebilecek yeni bir trafik işareti tanıma yöntemi olarak QR kodlarının kullanımı önerilmiştir [3]. Geleneksel yöntemler, trafik işaretlerini kamerayla görüntüleyip şekil ve renk analiziyle tanımaya çalışırken; bu işlem zaman ve bellek açısından maliyetlidir. Bu sorunu aşmak için QR kodları ile donatılmış trafik işaretlerinin kullanımı ve bu kodların araç üzerindeki kamera ile okunarak yorumlanması önerilmiştir. Ancak bu çözüm halihazırda zaten bazı şehirlerde bilgilendirme levhalarında kullanılmaktadır [4]. Ayrıca daha hızlı hareket eden araçların hareketleri nedeni ile aldıkları görüntülerin bulanıklaşma durumu ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle trafik işaretlerinin bilgi kodlamasının bulanıklaşmaya karşı dayanıklı olması gerekmektedir. Bu sorunun çözümü için kullanılabilecek bir yaklaşım olan robotik U dili [5] adı verilen bir yöntemin kullanılması olabilir. Robotik U dili; görsel temelli bir robot dili olup, kodlama işlemi için farklı uzunluklardaki çubukların iki boyutlu bir düzlemde düzenlenmesini sağlar. Sonrasında robotlar bu düzenlemeleri algılayarak işlemleri yürütür. Dil, özellikle bulanıklık ve çevresel faktörlerin etkisini azaltacak şekilde tasarlanmıştır. Yüksek hızlarda trafik levhalarında sürücü tarafından algılanabilecek bulanıklık ve sürücünün buna uygun aksiyonu zamanında alamama ihtimaline karşın U dili ile kodlanan trafik levhaları akıllı araçların sahip oldukları kamera sistemleri ile otomatik algılanabilir. Hatta U dili ile kodlanmış trafik levhalarının araçlar tarafından algılanması sonrası araçtaki otonom sistemler devreye sokulabilir. Örneğin 150 km/sa hızla giden bir araç hız limitinin 120'ye düştüğü bir yoldaki, levha sonrası hız sabitleyici fonksiyonunu devreye alarak aracın 120 km/sa hıza düşürülmesini ve bu limit civarında seyre devam etmesini sağlayabilir. Bu kapsamda Türkiye Cumhuriyeti Karayollarında kullanılmakta olan

tehlike uyarı işaretleri ve trafik tanzim işaretleri incelenmiştir.

2. KAVRAMSAL ARKA PLAN

Robotik U dili (RoboULang) [5] temel olarak görsel bir dildir; bu nedenle iki boyutlu matrisler üzerinde çalışan bir görüntüleme sistemi gereklidir. RoboULang'ın robotlar tarafından kolayca anlaşılması amaçlandığı için net bir desen üzerine kurulması gerekir. Bu desen, "U" harfidir. U'nun alt kısmı bir ufuk çizgisi olarak düşünülebilir, bu bir referans hattıdır. Şekil 1'de robotik U dili genel görünümü verilmiştir.



Şekil 1. Robotik U dili genel görünüm

Çerçevenin içine dikey çubuklar (rod) yerleştirilerek bilgi kodlaması yapılmaktadır. Kodlama; çubukların sayısı (NumL) ve uzunluğu ile ifade edilmekte ve her çubuğun uzunluğu belirli bir birim uzunluk (UnitL) çarpanı ile değişmektedir.

Düşey çizginin uzunluğu (UnitL) ile U harfini oluşturan çizgilerin maksimum uzunluğu (MaxL) arasındaki ilişki şu şekildedir:

$$MaxL = CodeFactor \times UnitL \quad (1)$$

CodeFactor, bir tam sayıdır. Örneğin, CodeFactor=4 olarak alınırsa kodlama kapasitesi artar ancak çözümleme sırasında oluşabilecek hatalara tolerans azalır. RoboULang'ı kullanacak bir sistem tasarımcısı, CodeFactor değerini kendi sorunlarına ve önceliklerine göre seçmelidir. UnitL, görüntülemeye kolayca anlaşılabilir en küçük parça boyutudur. Bu boyut, algılayıcıların hızına ve görüş açısına bağlı olarak bulanıklık durumlarında bile net bir şekilde algılanabilecek bir hassasiyete göre seçilmelidir. CodeFactor, bu boyut ile U harfini oluşturan en uzun dikey parçaların oranıyla belirlenir (b/a)[5].

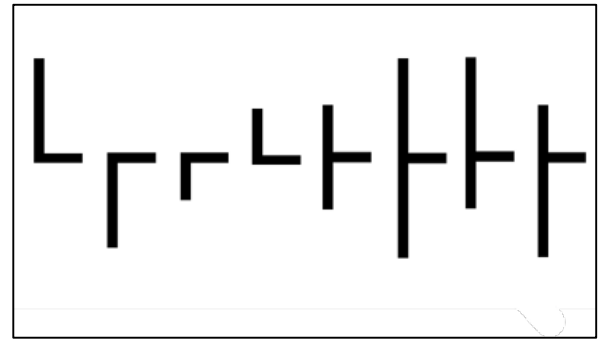
Robotik U dilinde genel olarak 3 farklı gövde yapısı bulunmaktadır [5]. Bu durum her kodlama durumunda görsel olarak kullanılabilen şekillerin 3 katına çıkabileceğini göstermektedir.

Kodlar, sekizli taban (base-8), dörtlü taban (base-4) veya daha yüksek tabanlarda ifade edilebilir. Kodlama sisteminde CodeFactor ve NumL değerleri azaltılarak daha az kod üretilebilir, bu sayede daha hata toleranslı bir kodlama sağlanır. Örneğin, CodeFactor=2 ve NumL=3 için toplam kodlama kapasitesi 192 olmaktadır [5].

Yapılan bulanıklık çalışmalarında robotik U dili dama tahtası ve QR kod gibi görsel tabanlı yöntemlerle kıyaslanmış ve hız sebepli bulanıklığa daha uygun olduğu deneysel olarak kanıtlanmıştır. Ayrıca robotların hız kesmeden kodları okuyabilme imkânı sayesinde enerji verimliliğini artıracak bu yanarda kodlama kapasitesinin geliştirebilir ve ölçeklenebilir olduğu da görülmektedir.

3. ÖNERİLEN YÖNTEM

Önerilen yöntemde trafik levhalarını kodlamak için seçilen U dili varyasyonları görsellere dayalı olarak hesap edilmiştir. Yalın robotik U dilinde CodeFactor=2 ve NumL=3 için toplam kodlama kapasitesinin 192 olduğu ifade edilmiştir. Ancak bu çalışmada görsel dayalı U varyasyonlarına bakıldığında sol ve sağ referans çizgiler sabit olmak üzere NumL ismini verilen orta çizgilerin her birinin uzunluğu için ihtimal sayısının 8 olduğu görülmektedir. Bu ihtimaller sırasıyla: üstte 2 birim, altta 0 birim; üstte 1 birim altta 0 birim; üstte 0 birim altta 2 birim; üstte 0 birim altta 1 birim; üstte 1 birim altta 1 birim; üstte 2 birim altta 2 birim; üstte 1 birim altta 2 birim ve üstte 2 birim altta 1 birimdir. Bu ihtimaller Şekil 2'deki görselde verilmiştir.



Şekil 2. CodeFactor=2 için rod kombinasyonları

Üç çizgi için 8 farklı ihtimalin kombinasyonu 8x8x8'den 512 olmaktadır. Ayrıca temel gövde yapısı sayesinde 512 görsel sayısı 3 katına çıkabildiğinden CodeFactor=2 ve NumL=3 için 1536 farklı görsel üretilebilir.

Eşleştirme ve deneysel çalışmalar Türkiye Cumhuriyeti Karayolları Trafik ve Tanzim İşaretleri üzerinden yapılmıştır. Buna göre kullanılmakta olan 129 adet trafik ve tanzim işareti bulunmaktadır [6]. Her ne kadar bu levhaların hız, eğim, yükseklik ve gabari bilgisi içerenlerin farklı sayısal durumları ile çeşitliliği mevcut olsa da bu sayı 512'yi aşmamaktadır.

Bu sebeple CodeFactor=2 ve NumL=3 parametreleri kullanılarak, temel gövde yapısı ise tek çeşit tercih edilerek yeterli sınıflandırma yapılabilmektedir. Ayrıca NumL

sayısının düşük olması yüksek bulanıklıkta hata toleransını artıracaktır.

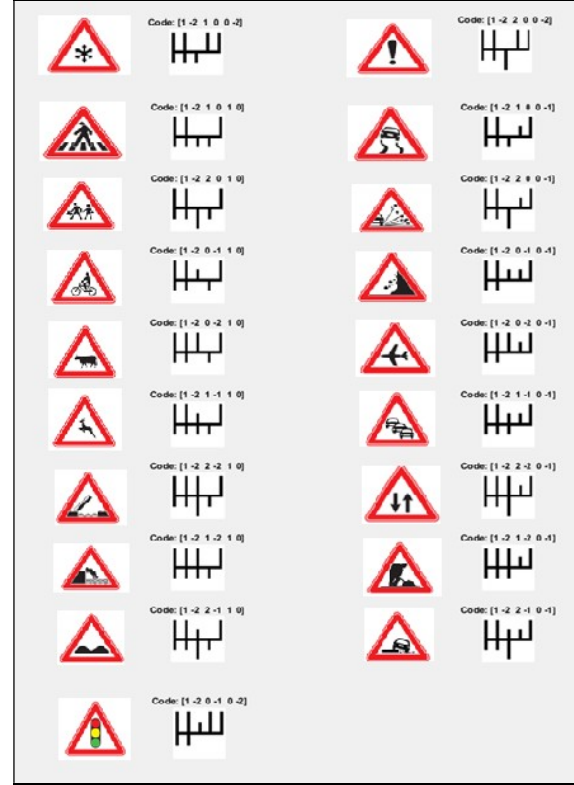
Yapılan sınıflandırmada NumL ismi verilen orta çizgilerden ilki üzerinde kombine edilebilecek 8 farklı çubuk uzunluğu ihtimali sebebiyle trafik ve tanzim işaretleri 8 farklı gruba ayrılmıştır.

- Sınıflandırma 1; Viraj, daralan kaplama, anayol-tali yol kavşak işaretlerini kapsamaktadır. U dilinde gösterimi 1. çizginin; yatay çizginin üst tarafında kalan 2x uzunluğunda olduğu işaret olarak belirlenmiştir.
- Sınıflandırma 2; genişlik ve yükseklik sınırlandırma levhalarını kapsamaktadır. U dilinde gösterimi 1. çizginin; yatay çizginin alt tarafında kalan 2x uzunluğunda olduğu işaret olarak belirlenmiştir.
- Sınıflandırma 3; Azami hız levhalarını kapsamaktadır. U dilinde gösterimi 1. çizginin; yatay çizginin alt tarafında kalan x uzunluğunda olduğu işaret olarak belirlenmiştir.
- Sınıflandırma 4; tehlikeli eğim işaretlerini kapsamaktadır. U dilinde gösterimi 1. çizginin; yatay çizginin üst tarafında kalan x uzunluğunda olduğu işaret olarak belirlenmiştir.
- Sınıflandırma 5; demiryolu geçidi yaklaşım levhalarını kapsamaktadır. U dilinde gösterimi 1. çizginin; yatay çizginin üst tarafında kalan x uzunluğunda; alt tarafında kalan çizginin de yine x uzunluğunda olduğu işaret olarak belirlenmiştir.
- Sınıflandırma 6; köprü başı, tehlikeli viraj, onarım yaklaşım, refüj başı ve demiryolu geçidi levhalarını kapsamaktadır. U dilinde gösterimi 1. çizginin; yatay çizginin üst tarafında kalan 2x uzunluğunda; alt tarafında kalan çizginin de yine 2x uzunluğunda olduğu işaret olarak belirlenmiştir.
- Sınıflandırma 7'de uyarı işaretleri kapsamındaki diğer işaretler kapsamıştır. U dilinde gösterimi 1. çizginin; yatay çizginin üst tarafında kalan 2x uzunluğunda; alt tarafında kalan çizginin ise x uzunluğunda olduğu işaret olarak belirlenmiştir.
- Sınıflandırma 8'de trafik tanzim işaretleri kapsamıştır. U dilinde gösterimi 1. çizginin; yatay çizginin üst tarafında kalan x uzunluğunda; alt tarafında kalan çizginin ise 2x uzunluğunda olduğu işaret olarak belirlenmiştir.

Ana sınıflandırma sonrası ikinci çizgiden itibaren ilgili levhaların ayrıştırılmasını sağlamak için kodlama yapılmıştır.

Sınıflandırma 7 olarak ifade edilen diğer uyarı işaretleri için 1. çizgi sınıflandırmaya uygun tutulduğunda bu kategorideki 19 işaret için farklı kodlamalar yapılabilir.

Şekil 3'te bu kategorideki işaretler için örnek bir eşleştirme verilmiştir. Görüldüğü üzere temel gövde yapısı değişmeksizin birinci çizgi uzunlukları sınıflandırma 7 için tayin edilmiş olan pozitif yönde 2 birim ve negatif yönde 1 birimdir.



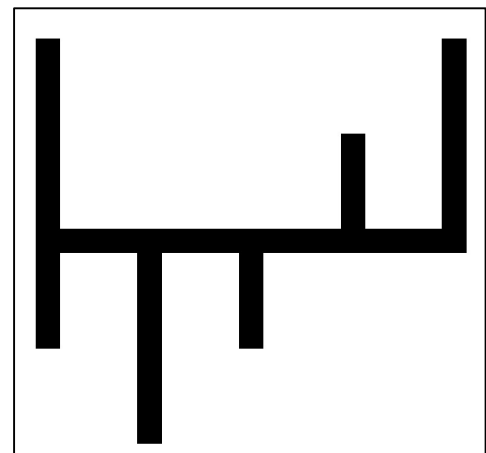
Şekil 3. Diğer uyarı işaretleri için örnek U görselleri

4. BULGULAR

Çalışma için seçilen parametrelerde (CodeFactor=2 ve NumL=3 olmak üzere) U görsellerinin tamamı MATLAB üzerinden üretilmiştir.

Bu görsellerden bazıları robotik dilde bulanıklığın etkisi ve robotun eşleştirebilme kapasitesini uygulayabilmek amacıyla kullanılacaktır.

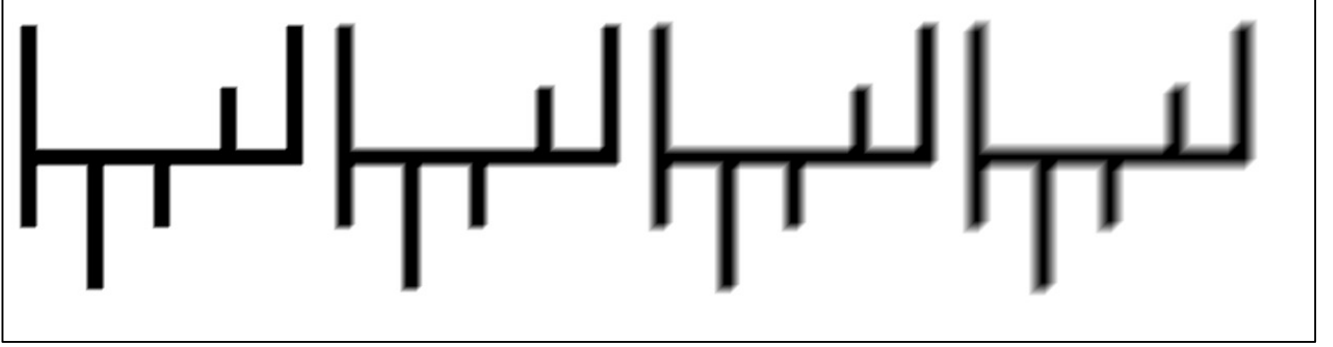
Deneyde kullanılmak üzere üretilen örnek U görseli Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4. Örnek U görseli

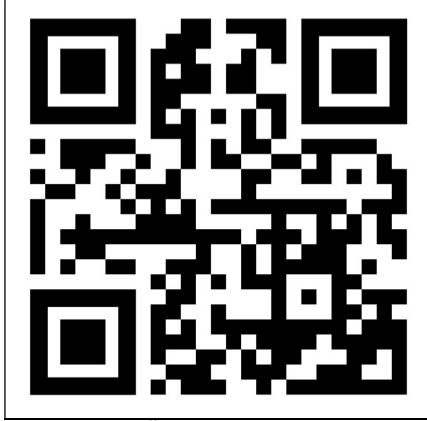
Deneyde kullanılan U görsellerine MATLAB üzerinde farklı yüzdelerde rotasyonel bulanıklık uygulanmıştır. Buna

göre görsellerin bulanıklık uygulanmış halleri Şekil 5'te verilmiştir. Yüksek derecede bulanıklık uygulanan U görselinde bile insan gözü ile referans ve tali çizgilerin ayırt edilebildiği görülmektedir.



Şekil 5. Soldan sağa: %25, %50, %75 ve %100 bulanıklık uygulanmış U kod örnekleri

Bulanıklığa dayanım açısından robotik U dili ile karşılaştırılabilecek bir görüntü temelli dil olan QR kod için de aynı deney yapılmıştır. 'Otomotiv Kongresi 2025' verisini içererek oluşturulan QR kod Şekil 15'te verilmiştir [7]. Bu haliyle bile QR kodların U görsellerinden daha karmaşık olduğunu görülebilmektedir.



Şekil 6. Örnek QR kod görseli

Örnek QR kod görseline farklı yüzdelerde bulanıklık uyguladığımızda ortaya çıkan görseller Şekil 7'de verilmiştir.

QR kod ve robotik U dili görsellerinin hareket sebebiyle oluşan bulanıklığa dayanımı konusunda aralarında büyük bir fark olduğu açıktır. Veri kapasitelerine bakacak olursak QR kodların daha fazla veri taşıyabildiğini söylemek mümkün olsa da [8] aynı kapasitede veriler robotik U dilinde CodeFactor ve NumL parametreleri artırılarak taşınabilir. Ancak bu faktörlerin artırılması, bulanıklığa dayanımın azalmasına ve hata düzeltme işlevinin kısıtlanmasına sebep olabilir. QR kod ve robotik U dili Tablo 1'de karşılaştırılmıştır.

Tablo 1. QR kod ve robotik U dilinin karşılaştırılması

Karakteristik	QR kod	Robotik U dili
Veri kapasitesi	Yüksek	Orta
Ana kullanım alanları	Web bağlantıları, ödemeler, biletleme işlemleri	Endüstri 4.0, robotlar arası iletişim, otonom Araçlar
Öne çıkan özellik	Mobil cihazlarla kolay tarama	Hareket kaynaklı bulanıklığa dayanıklı yapı
Bulanıklığa dayanıklılık	Orta	Çok yüksek



Şekil 7. Soldan sağa: %25, %50, %75 ve %100 bulanıklık uygulanmış QR kod örnekleri



Şekil 8. Bulanıklık uygulanan levha, QR kod ve U dili görselleri

Son olarak klasik trafik levhaları ve karşılığı olabilecek QR kod ve U dili görsellerine yüksek hızlarda oluşabilecek bulanıklık için benzetim ortamında bulanıklık uygulanmıştır ve aradaki farklar Şekil 8’de verilmiştir. Buna göre klasik trafik levhalarında hız bilgisinin okunmadığı; trafik levhalarının çeşitlilik sebepli maksimum görsel sayısını sağlayabilecek alternatif olarak seçilmesi muhtemel QR kod görsellerinin de yine yüksek hızlarda bulanıklık sebebiyle verimsiz olduğu görülmektedir. Buna karşılık U görsellerinin bulanıklığa oldukça dayanıklı olduğu; çıplak gözle görselin detaylarının fark edilebilir durumda olduğu ve ayrıca çizgi sayı/uzunluğu ile çok sayıda görsel oluşturabileceği görülmektedir.

5. SONUÇ

Çalışmada trafik işaretlerinin otomatik olarak algılanması üzerine odaklanılmış ve bu amaçla Robotik U dili (RobULang) kullanılmıştır. RobULang, özellikle endüstri 4.0 ve otonom sistemlerde robotlar arası iletişim için geliştirilmiş bir görsel dildir. Bu çalışmada yapılan analizlerde, RobULang’ın bulanıklığa karşı yüksek toleransa sahip olduğu gösterilmiştir. Bu durum, trafik işaretlerinin zamanla yıpranması, gece koşulları, titreşim kaynaklı görüntü bozulmaları gibi gerçek dünya koşullarında dahi RobULang’ın güvenilirliğini ortaya koymaktadır. Ayrıca RobULang, simetrik ve sade yapısıyla düşük maliyet sağlamaktadır.

Son olarak, bu sistemin otonom araçlar üzerindeki potansiyel katkısı göz önünde bulundurulmalıdır. Örneğin, hız sınırlaması gösteren bir tabela RobULang ile algılandığında, araç bu bilgiyi doğrudan okur ve var olan hıza bağlı olarak uyarlanabilir cruise control sistemini devreye sokabilir. Veya bir "dur" tabelası algılandığında, araç bu bölgeye yaklaşmadan önce yavaşlama komutunu

sürücüye iletebilir ya da tamamen otonom modda frene basabilir. Yaya geçidi algılandığında yayalara öncelik tanıyacak şekilde rota planlamasını yeniden düzenleyebilir. Tüm bu örnekler, görsel tabanlı trafik işareti tanımanın otonom sürüşte nasıl önemli bir rol oynayabileceğini göstermektedir.

6. REFERANSLAR

- [1] Wali, S. B., Abdullah, M. A., Hannan, M. A., Hussain, A., Samad, S. A., Ker, P. J., & Mansor, M. B. (2019). Vision-based traffic sign detection and recognition systems: Current trends and challenges. *Sensors*, 19(9), 2093. <https://doi.org/10.3390/s19092093>
- [2] Snyder, J., Dunn, D., Howard, J., Potts, T., & Hansen, K. (n.d.). Invisible 2D bar code to enable machine readability of road signs – Material and software solutions. 3M Transportation Safety Division. Retrieved from <https://multimedia.3m.com/mws/media/1825817O/6gj8sghhqxdtcdg5y231-tss-itms-us-wp-2d-bar-code-white-paper.pdf>
- [3] Jouini, A., Cherif, A., & Hasnaoui, S. (2023). QR-code traffic signs recognition for ADAS smart driving system. 2023 IEEE International Conference on Advanced Systems and Emergent Technologies (IC_ASET), 1–6. https://doi.org/10.1109/IC_ASET58101.2023.10150833
- [4] <https://www.qrcode-tiger.com/qr-codes-on-street-signs>
- [5] Sakarya, U. (2024). The visual-based robotic language for Industry 4.0 applications: Robotic U Language. *Signal, Image and Video Processing*, 18(1), 91–98. <https://doi.org/10.1007/s11760-023-02713-w>
- [6] Karayolları Genel Müdürlüğü. (2023). Düşey işaretleme standardı: Trafik işaret levhaları (Yol Notları Serisi No: 9). Ankara, Türkiye: Karayolları Genel Müdürlüğü Araştırma Dairesi Başkanlığı. <https://www.kgm.gov.tr/SiteCollectionDocuments/KGMdo>

cuments/Yayinlar/YolNotlariSerisi/YNS09-Dusey-Isaretleme.pdf
[7] <https://qrcodecreator.com>

[8] Hara, M., Watabe, M., Nojiri, T., Nagaya, T., Uchiyama, Y.: Optically readable two-dimensional code and method and apparatus using the same. Patent: US 5726435, (1998)

Alüminyum Alçak Basıncılı Dökümde Hızlı Prototipleme Yöntemlerinin Karşılaştırılması
Barış Çavunt¹, Cem Aydın²

¹Döktaş Dökümcülük Ticaret ve Sanayi A.Ş., OSB IV. Kısım, İsmail Tiryaki Caddesi, No:7 Yunusemre,
Manisa- TÜRKİYE

Tel: 236 233 80 57 E-Posta: baris.cavunt@doktas.com

²Döktaş Dökümcülük Ticaret ve Sanayi A.Ş., Fatih Mahallesi Gölyolu, No:26 Orhangazi, Bursa- TÜRKİYE
Tel: 224 573 4263 E-Posta: cem.aydin@doktas.com

Günümüz otomotiv endüstrisi, yeni teknolojilerin getirdiği giderek artan bir rekabet ortamında, daha yüksek kalite standartlarını daha düşük maliyetlerle karşılamak zorunda kalmaktadır. Özellikle elektrikli araçların hızla yaygınlaşması, otomotivde kullanılan bileşenlerin hem fonksiyonel hem de yapısal olarak yeniden değerlendirilmesini zorunlu kılmıştır. Bu dönüşüm, yalnızca araç performansını değil, aynı zamanda üretim ve prototipleme süreçlerini de doğrudan etkilemiştir. Yeni nesil araçların daha özgün ve aerodinamik tasarımlara sahip olması, bileşenlerin daha büyük ve daha karmaşık şekillerde üretilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu çalışmada, alüminyum alçak basınçlı döküm (LPDC) yöntemi özelinde hızlı prototipleme sürecinde tercih edilebilecek alternatif teknikler kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiştir. Özellikle parçaların karmaşık geometrilere sahip olması, prototipleme sürecinde kalıp tasarımı ve üretimi aşamasında büyük zorluklar yaratmaktadır. Bu çerçevede, 3D baskı teknolojisi ile üretilmiş kum kalıpların, geleneksel kum kalıplar ve CNC işleme gibi alternatiflerle üretimi sağlanamayacak parçaların üretilebilirliğine dair sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. 3D baskılı kum kalıplar, kalıp üretim süresini azaltmakta ve prototip parçaların nihai üretime yakın mekanik özelliklerde elde edilmesine olanak tanımaktadır. Yapılan literatür taraması ve uygulamalı analizler neticesinde, özellikle büyük boyutlu ve karmaşık yüzey geometrilerine sahip parçaların üretiminde, CNC işleme veya FDM gibi yöntemlerin çeşitli sınırlılıklar sebebiyle yeterli olmadığı ortaya konmuştur. CNC işleme yöntemi, karmaşık iç yapıları oluşturmakta zorlanırken, FDM tabanlı 3D baskılar ise boyut sınırları açısından yetersiz kalmaktadır. Bu nedenlerle, 3D baskılı kum kalıplar hem teknik uygunluk hem de üretim süresi açısından öne çıkmakta, hızlı prototipleme süreçlerinde neredeyse tek uygulanabilir seçenek olarak değerlendirilmektedir. Sonuç olarak bu çalışma, alüminyum LPDC sürecine entegre edilebilecek prototipleme yöntemlerini karşılaştırmalı olarak ele almakta ve karmaşık geometri prototip parçaların üretiminde 3D baskı teknolojisinin sunduğu avantajları ortaya koymaktadır. Hız, esneklik, üretim doğruluğu ve

maliyet etkinliği gibi kriterler göz önünde bulundurulduğunda, 3D baskı ile üretilmiş kum kalıpların alçak basınçlı dökümle birlikte kullanımı, otomotiv sektörünün güncel ihtiyaçlarını karşılayabilecek en etkin prototipleme çözümü olarak öne çıkmaktadır.

1. GİRİŞ

Otomotiv endüstrisi, artan rekabet ve maliyet baskıları nedeniyle, yüksek kaliteyi düşük maliyetle sağlayabilecek üretim yöntemlerine ihtiyaç duymaktadır. Özellikle elektrikli araçların yaygınlaşması, daha karmaşık ve büyük geometrilere sahip parçaların üretimini zorunlu kılmıştır. Bu durum, döküm teknolojileri ve prototipleme süreçlerinde yeni yaklaşımların geliştirilmesini gerektirmektedir. Geleneksel üretim yöntemleri, karmaşık geometrilere sahip parçaların prototipleme ve üretim süreçlerinde çeşitli sınırlamalar taşımaktadır. CNC işleme yüksek yüzey kalitesi sunmasına rağmen karmaşık iç yapıları üretmekte yetersiz kalmaktadır. FDM tabanlı 3D baskı ile üretilmiş ise boyut kısıtlamaları ve mekanik özellikler açısından prototipleme sürecinde sınırlı performans göstermektedir [1].

Son yıllarda, 3D baskı ile üretilmiş kum kalıpların döküm süreçlerinde sağladığı avantajlar çeşitli çalışmalarda raporlanmıştır. Örneğin, Walker ve ark. (2018) binder-jet teknolojisiyle üretilen akıllı kum kalıpların geometrik karmaşıklık ve üretim esnekliği açısından önemli avantajlar sunduğunu göstermiştir [2]. Castro-Sastre ve ark. (2021), Al-Si alaşımının 3D baskı ile üretilmiş kum kalıptan dökümü ile geleneksel kum kalıptan dökümünü karşılaştırmış ve mikroyapı ve korozyon dayanımı açısından farklılıklar gözlemlenmiştir [3]. Santamaría ve ark. (2022) LPDC yöntemiyle üretilen A356 alaşımının otomotiv parçalarının çekme dayanımını başarılı şekilde öngörebildiklerini raporlamıştır [4]. Streparava ve ark. (2024) ise 3D yazıcı ile üretilen kum kalıpların otomotiv prototiplerinde hızlı prototipleme süreçlerinde güvenilir mekanik ve mikroyapısal sonuçlar verdiğini ortaya koymuştur [5].

Bu çalışmada, 3D baskı ile üretilmiş kum kalıpların alüminyum alçak basınçlı döküm (LPDC) sürecine entegrasyonu deneysel olarak incelenmiştir. Amaç, farklı kalıp ve döküm yöntemlerini karşılaştırmalı olarak değerlendirmek ve karmaşık geometrilili prototip parçaların üretiminde en uygun yöntemi belirlemektir. Hız, esneklik, üretim doğruluğu ve maliyet etkinliği gibi kriterler göz önünde bulundurulduğunda, 3D yazıcı ile üretilen kum kalıpların alçak basınçlı dökümle birlikte kullanımı, otomotiv sektörünün güncel ihtiyaçlarını karşılayabilecek en etkin prototipleme çözümü olarak öne çıkmaktadır. Çalışmada, Alçak Basınçlı Döküm, 3D baskı ile üretilmiş kum kalıp + kokil döküm, çelik kalıp + kokil döküm, yaş kum kalıp + kokil döküm, 3D baskı ile üretilmiş kum kalıp yöntemleri kullanılarak numuneler üretilmiş ve mekanik özellikler ile porozite seviyeleri açısından analiz edilmiştir.

2. MALZEME VE METOT

Bu çalışmada kullanılan numuneler, farklı kalıplama ve döküm yöntemlerinin karşılaştırılması olarak incelenmesine dayanmaktadır. Çalışmada üç farklı kalıp teknolojisi kullanılmıştır. Bunlar sırasıyla, 3D baskılı kum kalıba kokil döküm Şekil 1, 3D baskılı kum kalıba alçak basınçlı döküm Şekil 2., çelik kalıba kokil döküm Şekil 3., yaş kum kalıba kokil döküm Şekil 4. olarak sıralanmıştır.



Şekil1. 3D Yazıcı ile Üretilen Kum Kalıba Kokil Döküm



Şekil2. 3D Baskılı Kum Kalıba Alçak Basınçlı Döküm



Şekil3. Çelik Kalıba Kokil Döküm



Şekil4. Yaş Kum Kalıba Kokil Döküm

2.1. Numune Yerleşimi ve Üretim

Her kalıptan 4 adet numune alınabilecek şekilde kalıplanmıştır. Numune boyutları DIN50125 standartına uygun hale getirilmiştir. Alçak basınçlı döküm kalıbı için tasarımın Şekil 5'te de görülen tezgah boyutlarına uyarlanabilmesi adına 5 adet aynı numune formu yan yana gelecek şekilde toplam 20 adet numune çubuğu üretilebilecek şekilde tasarım yapılmıştır.



Şekil5. Alçak Basınç için Uyarlanan Kum Kalıp

2.2. Kimyasal Analiz

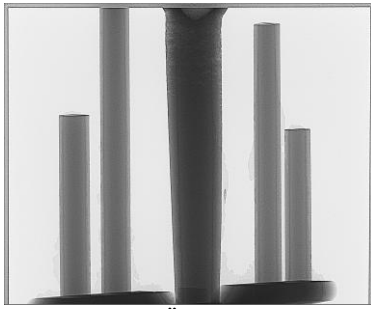
Numunelerin kimyasal bileşimleri, Spectro Lab M12 Optik Emisyon Spektrometresi kullanılarak belirlenmiştir. Analizler sonucunda alaşımların Si, Mg, Fe, Mn, Ti ve Sr gibi ana element içerikleri tespit edilmiş ve standart alaşım kompozisyon aralıklarıyla karşılaştırılmıştır. Tablo 1'de bu numunelerin kimyasal bileşen değerleri gösterilmiştir.

Numune	Si (%)	Mg (%)	Fe (%)	Mn (%)	Ti (%)	Diğer (%)
3D + Kokil	7,16	0,332	0,1	<0,0002	0,096	<0,005
3D + ABD	7,091	0,336	0,104	<0,0002	0,096	<0,005
Çelik + Kokil	7,16	0,332	0,1	<0,0002	0,096	<0,005
Yaş Kum + Kokil	7,345	0,346	0,152	<0,0002	0,09	<0,005

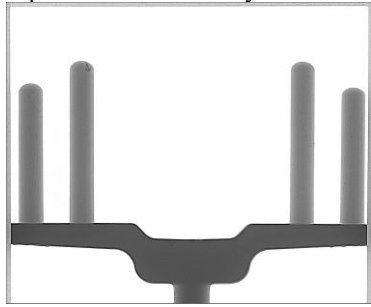
TABLO 1. Numunelerin Kimyasal Bileşim Değerleri

2.3. X-Ray Muayenesi

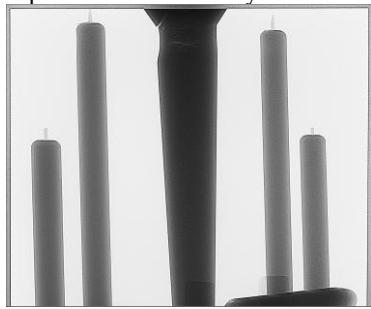
Numunelerde döküm kaynaklı iç kusurların tespiti amacıyla X-ray radyografik muayene yapılmıştır. ASTM E155 standardına göre değerlendirilen muayene sonuçları, gözeneklilik, gaz boşlukları ve çekinti kusurları incelenmiştir. X-ray cihazının 120–160 kV aralığında çalıştırılması ile Şekil 5, Şekil 6, Şekil 7 ve Şekil 8’de görülen X-Ray görüntüleri elde edilmiştir.



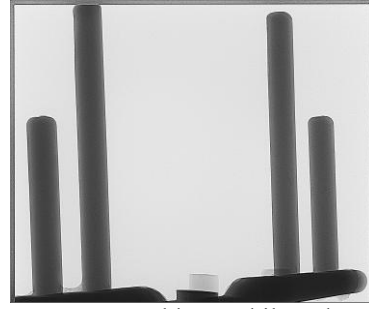
Şekil5. 3D Yazıcı ile Üretilen Kum Kalıba Kokil Döküm Yapılan Numune X-Ray Görsele



Şekil6. 3D Baskılı Kum Kalıba Alçak Basıncılı Döküm Yapılan Numune X-Ray Görsele



Şekil7. Çelik Kalıba Kokil Döküm Yapılan Numune X-Ray Görsele



Şekil8. Yaş Kum Kalıba Kokil Döküm Yapılan Numune X-Ray Görsele

2.4. Mekanik Test Numunelerinin Hazırlığı ve Çekme Testi

Isıl işlem ve X-ray kontrolü sonrası numuneler, çekme testine uygun hale getirilmiştir. Bunun için numuneler DIN 50125 standardına uygun olarak işlenmiştir. CNC torna ve freze tezgâhlarında hazırlanan numunelerin boyutları standarda göre kontrol edilmiştir. Numunelerin mekanik özellikleri, standart çekme testi ile belirlenmiştir. Deneyler, oda sıcaklığında, 10 kN yük hücresi hassasiyetine sahip aşağıdaki Şekil 9.’da bahsedilen servo-hidrolik çekme cihazı kullanılarak yapılmıştır.



Şekil 9. Servo-Hidrolik Çekme Cihazı

Yapılan deneylerde aşağıda yer alan Tablo 2.’deki parametreler elde edilmiştir:

	Çekme Mukavemeti(MPa)	Akma Mukavemeti (MPa)	%Uzama
Kokil 3D	260,23	180,92	1,44
Kokil 3D	242,41	172,88	1,16
Kokil 3D	254,52	189,11	0,87
Kokil Çelik	264,26	238,77	1,42
Kokil Çelik	273,69	241,36	1,36
Kokil Çelik	286,48	247,81	1,54
Kokil Çelik	274,08	241,79	1,28
Kokil Çelik	276,04	238,46	1,47
Kokil Çelik	281,48	250,58	1,26
Kokil Çelik	227,73	224,68	2,45
Kokil Çelik	240,69	218,46	3,46
Kokil Çelik	228,26	236,42	2,96
Yaş Kum	240,22	173,56	1,23
Yaş Kum	257,52	168,32	0,6
Yaş Kum	275,28	172,54	0,83
AB3D	296,88	222,12	2,25
AB3D	282,54	236,22	1,86
AB3D	276,55	216,28	2,46

TABLO 2. Mukavemet Değerleri

3. DENEYSEL BULGULAR

3.1 Kimyasal Analiz

Numunelerin kimyasal bileşimleri Spectro Lab M12 optik emisyon spektrometresi ile belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 1’de sunulmuş olup, değerler alaşım standartlarıyla karşılaştırılarak yorumlanacaktır.

Numune	Si (%)	Mg (%)	Fe (%)	Mn (%)	Ti (%)	Diğer (%)
3D + Kokil	7,16	0,332	0,1	<0,0002	0,096	<0,005
3D + ABD	7,091	0,336	0,104	<0,0002	0,096	<0,005
Çelik + Kokil	7,16	0,332	0,1	<0,0002	0,096	<0,005
Yaş Kum + Kokil	7,345	0,346	0,152	<0,0002	0,09	<0,005

TABLO 3. Numunelerin Kimyasal Analiz Sonuçları

3.2 Çekme Testi Sonuçları

Çekme testi sonuçları incelendiğinde, 3D baskılı kum kalıp ile kokil döküm yöntemi düşük çekme mukavemeti (240,46 MPa) ve sınırlı süneklik (% uzama 1,16) göstermiştir. Çelik kalıp ile kokil döküm yöntemi ise yüksek akma dayanımı (237,59 MPa) ve en iyi süneklik (% uzama 2,11) ile öne çıkmıştır. Yaş kum kalıp ile kokil dökümde çekme mukavemeti orta seviyede (257,67 MPa) bulunmuş, ancak süneklik oldukça düşük (% uzama 0,89) kalmıştır. En başarılı sonuç ise 3D baskılı kum kalıp ile alçak basınçlı döküm yönteminde elde edilmiş, bu yöntem hem en yüksek çekme mukavemetine (285,32 MPa) hem de dengeli bir sünekliğe (% uzama 2,03) ulaşmıştır.

3.3 X-Ray Muayene Bulguları

ASTM E155 standardına göre yapılan X-ray muayenelerinde porozite seviyeleri değerlendirilmiştir. Her bir döküm yöntemi için gözlenen seviyeler Tablo 4’te verilmiştir.

Numune	Porozite Seviyesi (ASTM E155)	Gözenek Dağılımı	Yorum
3D + Kokil	5	Kümelenmiş	3D Kum kalıp ile kokil dökümde daha homojen bir yapı gözlemlenirken, yer yer küçük porozite oluşumları tespit edilmiştir.
3D + ABD	4	Homojen	3D baskılı kum kalıp ile alçak basınçlı dökümde elde edilmiş, bu yöntemde gözeneklerin yer yer kümelendiğini fakat genel olarak homojen dağıldığını göstermiştir.
Çelik + Kokil	4	Homojen	Hızlı soğuma nedeniyle gözenekler daha az ve daha küçük, homojen dağılmıştır.
Yaş Kum + Kokil	5	Kümelenmiş	Yaş kum kalıp ile kokil dökümde ise iri boyutlu ve düzensiz gözenekler yaygın olarak ortaya çıkmıştır.

TABLO 4. X-Ray Muayenesi Porozite Seviyeleri

3.4 Tartışma

Sonuçlar, kalıp türünün ve döküm yönteminin mekanik performans üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Geleneksel yaş kum kalıplar prototipleme sürecinde hızlı bir çözüm

sunsa da mekanik özellikler açısından sınırlıdır ve kompleks geometrileri bu döküm yöntemi ile sağlamak zordur. Çelik kalıplar yüksek kalite sağlamasına rağmen, prototip üretiminde maliyet ve zaman açısından dezavantajlıdır. Aynı zamanda parça tasarımlarının çelik kalıp tasarımına göre elverişli tasarlanması gerekmektedir. Karmaşık geometrili parçaların çelik kalıpla çıkarılması mümkün olmayabilir.

Buna karşılık, 3D baskı ile üretilmiş kum kalıpların alçak basınçlı döküm ile entegrasyonu hem yüksek mekanik özellikler hem de üretim esnekliği sağlamaktadır. Bu durum, özellikle otomotiv sektöründe karmaşık geometrilerle sahip prototip parçaların üretilmesinde önemli bir avantaj sunmaktadır.

4. SONUÇLAR

Bu çalışma, alüminyum alçak basınçlı döküm (LPDC) sürecinde hızlı prototipleme için kullanılan çeşitli kalıplama ve döküm yöntemlerinin karşılaştırmalı bir analizini sunmaktadır. Özellikle, günümüz otomotiv endüstrisinin yüksek kalite ve düşük maliyet gereksinimlerine cevap verebilecek çözümler aranmıştır. Çalışma kapsamında, 3D yazıcı ile kum kalıplama, geleneksel yaş kum kalıp ve çelik kalıp gibi farklı kalıp türleri ile döküm yöntemlerinin, üretilen parçaların mekanik özellikleri (çekme mukavemeti ve süneklik) ve porozite seviyeleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Deneysel analizler, kalıp tipi ve döküm metodunun son ürünün performansı üzerinde emsal bir etkiye sahiptir. Klasik yöntemlerden birisi olan yaş kum kalıplar, aşırı düşük maliyetlice bir prototipleme çözümü olmasına rağmen, kompleks geometrilerle sahip parça üretimi için uygundur. Çelik kalıplar ise yüksek kalite ve iyi mekanik özellikler güvenliği sağlamasına karşın, yüksek maliyetli olmasının ve karmaşık geometriye sahip parçaların imalatı dezavantajlı kalması nedeniyle prototip aşamasına uygun bir çözüm değildir. Bilakis, 3D yazıcı ile kum kalıplama, alüminyum düşük basınçlı döküm tekniği ile kombinasyonu alınıp beraber kullanıldığında en üst düzey performansı sağlamıştır. Bu ikili kombinasyon, iyi bir çekme mukavemetine ve dengeli sünekliğe ulaşmıştır. 3D yazıcı ile üretilen kum kalıpların bedeli, başlangıçta aşlangıçta geleneksel yöntemlere kıyasla daha yüksek olsa da teknoloji geliştikçe fiyat seviyesinin düşmesi beklenmektedir. Ancak, yapılan çalışmalara göre, 3D yazıcı ile üretilen kum kalıbını kokil döküm yöntemiyle yeterli performans sağlamadığını ve en iyi mekanik özellikler için alçak basınçlı dökümle birleştirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Nihayetinde, bu çalışmada modern otomotiv sanayisinin ihtiyaçlarına yönelik olarak 3D yazıcı (Binder jetting) teknolojisinin döküm süreçlerine entegrasyonunun modern otomotiv sektöründe kritik bir öneme sahip

olduğunu vurgulamaktadır. Gelecekte yapılacak çalışmalar, bu teknolojinin daha geniş endüstriyel uygulamalara adaptasyonu ve farklı alışımlar üzerindeki etkilerine odaklanabilir.

5. REFERANSLAR

- [1] J. Walker, E. Harris, C. Lynagh, et al., "3D Printed Smart Molds for Sand Casting," *Int. J. Met.*, vol. 12, no. 4, pp. 785–796, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s40962-018-0211-x>
- [2] M.Á. Castro-Sastre, C. García-Cabezón, and A. Fernández-Abia, "Comparative Study on Microstructure and Corrosion Resistance of Al-Si Alloy Cast from Sand Mold and Binder Jetting Mold," *Metals*, vol. 11, no. 9, p. 1421, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/met11091421>
- [3] J.A. Santamaría, J. Sertucha, A. Redondo, I. Lizarralde, E. Ochoa de Zabalegui, and P. Rodríguez, "Towards the Prediction of Tensile Properties in Automotive Cast Parts Manufactured by LPDC with the A356.2 Alloy," *Metals*, vol. 12, no. 4, p. 656, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/met12040656>
- [4] S. Cecchel and G. Cornacchia, "Additive Manufacturing for Rapid Sand Casting: Mechanical and Microstructural Investigation of Aluminum Alloy Automotive Prototypes," *Metals*, vol. 14, no. 4, p. 459, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/met14040459>

ALSi7 VE ALSi10 ALAŞIMLARINDA YORULMA DAVRANIŞININ DENEYSEL VE SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ

Fahrettin Aydemir¹, Serkan Gündoğdu¹

¹ Döktaş Dökümcülük Tic. ve San. A.Ş. Organize Sanayi Bölgesi 4. Kısım İsmail Tiryaki Cad No: 7 Yunusemre
– Manisa – Türkiye

Tel: +90 236 233 8057 E-Posta: fahrettin.aydemir@doktas.com, serkan.gundogdu@doktas.com -

Alüminyum esaslı döküm alaşımları, sahip oldukları üstün fiziksel ve mekanik özellikler sayesinde birçok endüstriyel uygulamada yaygın biçimde kullanılmaktadır. Özellikle AlSi7 ve AlSi10 alaşımları, yüksek mukavemet/ağırlık oranı, mükemmel dökülebilirlik, korozyon direnci ve iyi işlenebilirlik gibi avantajları ile dikkat çekmektedir. Bu özellikleri sayesinde söz konusu alaşımlar, havacılık, otomotiv ve savunma sanayii gibi yüksek performans ve güvenilirlik gerektiren sektörlerde kritik yapısal elemanlar olarak tercih edilmektedir. Bu tür uygulamalarda, sadece statik dayanım değil, aynı zamanda uzun süreli yüklemelere karşı direnç gösteren yorulma dayanımı da büyük önem arz etmektedir. Özellikle titreşim, darbeli yükleme veya çevrimsel gerilmelere maruz kalan parçalarda yorulma davranışının güvenilir şekilde belirlenmesi, tasarım ve mühendislik hesaplamaları açısından hayati rol oynamaktadır.

Bu çalışmada, iki farklı AlSi7 ve bir AlSi10 döküm alaşımından üretilmiş olan toplam 15 adet numune üzerinde yorulma testleri gerçekleştirilmiştir. Numuneler, otomotiv sektöründe sıklıkla kullanılan akson ve salıncak kolu gibi işlevsel parçalardan alınmış olup, testlerde 1.500.000 çevrimine kadar yorulma yüklemesi uygulanmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda her bir numune için yorulma limit değerleri tespit edilmiştir. Deneysel testlere ek olarak, aynı parçaların sonlu elemanlar yöntemi (FEA) ile sayısal analizleri yapılmış ve simülasyon yoluyla elde edilen yorulma limit değerleri ile laboratuvar sonuçları karşılaştırılmıştır. Gerçekleştirilen bu karşılaştırmalar sonucunda, sayısal analizler ile deneysel veriler arasında ortalama %15'lik bir farklılık olduğu gözlemlenmiştir.

Bu farkın temel nedenleri arasında döküm sırasında ortaya çıkan porozite ve gaz boşlukları gibi hatalar yer almaktadır. Sayısal modellerde bu tür mikro yapısal kusurların göz ardı edilmesi, analiz sonuçlarının deneysel verilerle tam olarak örtüşmemesine neden olmuştur. Bu durum, döküm hatalarının yorulma dayanımı üzerindeki doğrudan ve belirgin etkisini açıkça ortaya koymaktadır. Ayrıca elde edilen sonuçlar, sonlu elemanlar

analizlerinin doğruluk ve güvenilirliğini artırmak amacıyla, modelleme sürecinde döküm kaynaklı kusurların mutlaka dikkate alınması gerektiğini göstermektedir. Genel olarak bu çalışma, hem deneysel hem de sayısal yaklaşımların birlikte kullanılarak elde edilen sonuçların karşılaştırılması ile mühendislik uygulamalarında daha doğru ve güvenilir yorulma tahminleri yapılabileceğini ortaya koymakta; bu bağlamda entegre analiz yaklaşımlarının tasarım süreçlerinde önemini vurgulamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Alüminyum, Döküm, Yapısal Analiz, Sonlu Elemanlar, Yorulma Testi

1. GİRİŞ

Alüminyum esaslı döküm alaşımları, sahip oldukları üstün fiziksel ve mekanik özellikler nedeniyle otomotiv, havacılık ve savunma sanayii gibi birçok endüstriyel alanda yaygın şekilde kullanılmaktadır [1–3]. Özellikle Al-Si sistemine dayalı döküm alaşımları, yüksek mukavemet/ağırlık oranı, mükemmel dökülebilirlik, korozyon direnci ve işlenebilirlik gibi avantajlarıyla öne çıkmaktadır [4]. Bu alaşımlar arasında AlSi7 ve AlSi10, kritik yapısal elemanlarda tercih edilen en yaygın kompozisyonlardan ikisidir.

Bu tür uygulamalarda tasarım açısından yalnızca statik dayanım yeterli olmamakta, aynı zamanda uzun süreli yüklemeler altında güvenilir performans sağlayan yorulma dayanımı da belirleyici rol oynamaktadır. Özellikle çevrimsel yükleme, titreşim ve darbeli zorlamalara maruz kalan parçaların yorulma davranışının doğru şekilde öngörülmesi, güvenlik ve maliyet açısından kritik öneme sahiptir [5,6]. Otomotiv süspansiyon sistemleri, motor bağlantı elemanları ve direksiyon bileşenleri gibi parçalar, bu tür yorulma kaynaklı hasarlara karşı en riskli bileşenler arasında yer almaktadır.

Literatürde, Al-Si alaşımlarının yorulma davranışı üzerine çok sayıda çalışma yapılmış olup, bu çalışmalar genellikle malzemenin kimyasal bileşimi, ısıtma işlem koşulları, döküm yöntemi ve mikro yapısal kusurların yorulma ömrüne etkisi

üzerine yoğunlaşmıştır [7–9]. Özellikle porozite, gaz boşlukları ve mikroyapısal heterojenlik gibi döküm kaynaklı hataların yorulma dayanımını sınırlayan en önemli faktörler olduğu defalarca vurgulanmıştır [10]. Bununla birlikte, sonlu elemanlar yöntemi (FEA) ile yapılan yorulma analizleri, çoğu zaman ideal ve homojen malzeme varsayımına dayandığından, deneysel sonuçlarla tam uyum göstermemektedir. Bu nedenle, deneysel veriler ile sayısal analizlerin karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesi, daha güvenilir tasarım kriterlerinin oluşturulması açısından önem taşımaktadır.

Bu çalışmada, AlSi7 ve AlSi10 alaşımlarından üretilmiş parçaların yorulma davranışı hem deneysel testlerle hem de sonlu elemanlar yöntemi ile sayısal olarak incelenmiştir. Deneysel bulgular ile sayısal sonuçlar karşılaştırılmış, ortaya çıkan farkların temel nedenleri tartışılmıştır. Elde edilen sonuçlar, döküm kusurlarının yorulma ömrü üzerindeki belirleyici etkisini ortaya koymakta ve sayısal modelleme süreçlerinde bu kusurların mutlaka dikkate alınması gerektiğini göstermektedir. Böylelikle, tasarım ve analiz süreçlerinde daha güvenilir yorulma ömrü tahminleri yapılmasına katkı sağlanması hedeflenmektedir.

2. MALZEME METOD

2.1 NUMUNE HAZIRLIĞI

Bu çalışmada, döküm alüminyum alaşımlarının yorulma davranışlarının sistematik olarak incelenebilmesi amacıyla otomotiv endüstrisinde yaygın olarak kullanılan AlSi7Mg ve AlSi10Mg alaşımları seçilmiştir. Söz konusu alaşımlar, hem hafiflik hem de mekanik dayanım gereksinimlerini karşılayabilmeleri nedeniyle endüstride kritik bileşenlerde tercih edilmekte olup, çalışma kapsamında söz konusu iki alaşımı temsil edecek şekilde toplam 15 adet deney numunesi hazırlanmıştır. Numuneler, yüksek yük taşıyan akson ve salıncak kolu parçalarının üretimlerinden elde edilmiş, her iki alaşım için de numunelerin ardışık parçalar üzerinden seçilmesine dikkat edilmiştir. Böylelikle, hazırlanan tüm numunelerin aynı ergitme koşulları altında ve aynı potadan dökülmüş parçalar üzerinden temin edilmesi sağlanmış, bu sayede numuneler arasında oluşabilecek kimyasal bileşim farklılıkları ve dökümden gelen farklılıklar minimize edilmiştir.

Hazırlanan numunelerin kimyasal bileşimleri, Spectro Lab M12 optik emisyon spektrometresi kullanılarak analiz edilmiş, her bir alaşım için elde edilen elementel dağılımlar Tablo 1’de sunulmuştur. Yapılan analizler, kullanılan numunelerin literatürde tanımlanan standart alaşım aralıkları ile uyumlu olduğunu göstermiştir.

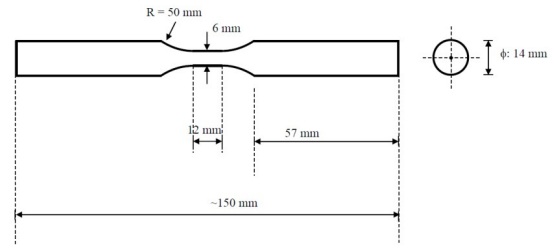
TABLO 1. AlSi7Mg ve AlSi10Mg alaşımlarının kimyasal bileşim sonuçları.

Alaşım	Fe (maks.)	Si (%)	Mn (maks.)	Ti (maks.)	Cu (maks.)	Mg(%)	Zn (maks.)
AlSi9Mg (ENAC-43300)	0.19	9.0–10.0	0.10	0.15	0.05	0.25–0.45	0.07
AlSi7Mg0.3 (ENAC-42100)	0.19	6.5–7.5	0.10	0.25	0.05	0.25–0.45	0.07



Şekil 1. Spectro Lab M12 optik emisyon spektrometresi.

Yorulma testlerinde kullanılacak deney numuneleri, uluslararası standartlarla uyumlu olacak şekilde hazırlanmıştır. Bu kapsamda, numunelerin hazırlanmasında ASTM E466 standardı dikkate alınmış, işleme süreci CNC tezgâhlarında hassas olarak gerçekleştirilmiş ve yüzey kalitesi ile geometrik ölçülerin standarda uygunluğu deney öncesinde doğrulanmıştır. Numuneler, standartta tanımlanan “Specimens with Tangentially Blending Fillets Between the Test Section and the Ends” tipine uygun şekilde üretilmiş olup, geçiş bölgelerinde oluşturulan filletler aracılığıyla olası gerilme yığılmalarının minimize edilmesi hedeflenmiştir.



Şekil 2. ASTM E466’ya göre hazırlanmış yorulma numunesi geometrisi



Şekil 3. Döktaş'a ait air yorulma numunesi örneği.

Deneyisel çalışmalar, Ege Matal Laboratuvarı bünyesinde bulunan servo-hidrolik yorulma test cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tüm deneyler, kontrollü laboratuvar koşullarında, oda sıcaklığında (yaklaşık 22 ± 2 °C) yürütülmüştür. Deneyisel parametreler sabit tutulmuş olup, tüm numunelere 20 Hz frekansta ve $R = 0,1$ yükleme oranında yük uygulanmıştır. Ayrıca, müşteri tarafından belirlenen “sonsuz ömür” kriteri doğrultusunda, tüm numunelerde deneyler 1.500.000 (çevrim) değerine kadar sürdürülmüştür. Bu sayede, sonuçların hem standarda hem de endüstriyel uygulama kriterlerine uygunluğu sağlanmıştır.



Şekil 4. Yorulma test konfigürasyonu ve cihaza yerleştirilmiş numune görüntüsü.

Çalışmada kullanılan yorulma cihazının teknik özellikleri Tablo 2’de özetlenmiştir. Bu teknik parametreler, deneyisel testlerin uygulanabilirlik sınırlarını ve elde edilen sonuçların güvenilirliğini doğrudan etkilemesi bakımından önem arz etmektedir.

TABLO 2. SHIMADZU yorulma test cihazına ait teknik özellikler.

Özellik	Değer / Açıklama
---------	------------------

Model	SHIMADZU EHF-EV200k2-040-0A
Dinamik kapasite	± 200 kN
Statik kapasite	240 kN
Maksimum frekans	20 Hz
Hareket mesafesi	± 50 mm
Silindirik numune ölçüleri	8–30 mm
Prizmatik numune ölçüleri	0–20 mm
Basma plakası çapı	160 mm
3 nokta eğilme desteği mesafesi	120–240 mm

2.3 Sonlu Elemanlar Analizi

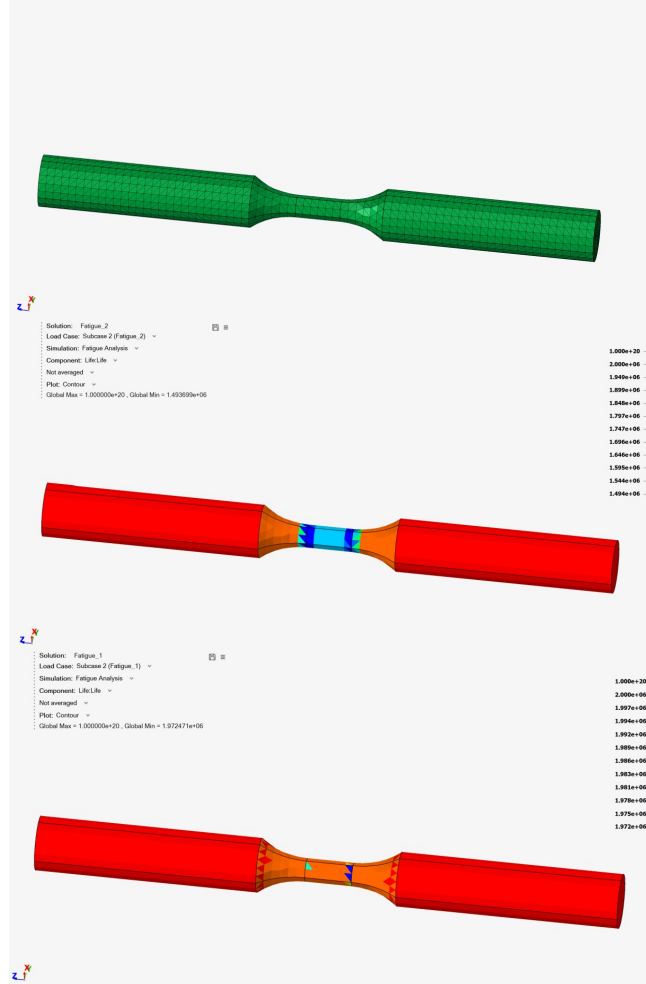
Deneyisel bulguların desteklenmesi ve yorulma davranışının farklı yükleme koşulları altında öngörülmesi amacıyla sayısal analizler, Altair SimLab yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, yorulma numunelerinin üç boyutlu CAD modelleri oluşturulmuş ve sonlu elemanlar modeli hazırlanmıştır.

Analizlerde kullanılacak malzeme özellikleri literatürden [1,3,5] ve deneyisel çekme testlerinden elde edilen verilerden alınarak modele entegre edilmiştir. Yorulma ömrü tahminleri için gerilme-ömür (S-N) yaklaşımı tercih edilmiş, her bir alaşım için uygun S-N eğrileri tanımlanmıştır. Sınır koşulları, laboratuvar ortamında gerçekleştirilen yorulma testlerindeki yükleme senaryoları ile uyumlu olacak şekilde modellenmiştir.

Ağ yapısının doğruluğu, yorulma tahminlerinde kritik rol oynadığından, özellikle gerilme yığılmalarının yoğunlaştığı bölgelerde adaptif mesh refinement uygulanmıştır. Yorulma hesaplamalarında “stress-life” yöntemi kullanılmış, ortalama gerilme etkileri ise Goodman düzeltmesi ile hesaba katılmıştır [2,7]. Bu yöntem ile her bir yükleme seviyesinde yorulma ömrü dağılımları elde edilmiştir.

SimLab ile gerçekleştirilen analiz sonuçları, deneyisel verilerle karşılaştırıldığında, tahmin edilen yorulma limitlerinin deneyisel değerlerden ortalama %15 daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu

farklılığın temel sebebi olarak, sayısal modellerde malzemenin homojen ve kusursuz kabul edilmesi, gerçekte ise döküm sırasında oluşan porozite, gaz boşluğu ve mikroyapısal heterojenliklerin yorulma dayanımını düşürmesi gösterilmiştir [8–10].



Şekil 5. Yorulma analizinde kullanılan FEA modeli

3. SONUÇLAR

3.1 YORULMA TESTİ SONUÇLARI

Yorulma testleri sonucunda, her bir alaşım için elde edilen yorulma limit değerleri Tablo 2’de sunulmuştur.

TABLO 3. Yorulma Test Sonuçları.

Ürün Kodu	Maksimum Gerilme (MPa)	R	Frekans (Hz)	Çevrim Sınırı	Çevrim	Durum
Numune 1-ALSi7	95	0	20	1.500.000	1151157	Hasarlı
Numune 2-ALSi7	100	0	20	1.500.000	1102826	Hasarlı

Numune 3-ALSi7	105	0	20	1.500.000	1500000	Hasarsız
Numune 4-ALSi7	110	0	20	1.500.000	590584	Hasarlı
Numune 5-ALSi7	105	0	20	1.500.000	1386388	Hasarlı
Numune 6-ALSi7	110	0	20	1.500.000	495603	Hasarlı
Numune 7-ALSi7	105	0	20	1.500.000	1065295	Hasarlı
Numune 8-ALSi7	105	0	20	1.500.000	1500000	Hasarsız
Numune 9-ALSi7	105	0	20	1.500.000	1500000	Hasarsız
Numune 1-1-ALSi10	105	0	20	1.500.000	1500000	Hasarsız
Numune 1-2-ALSi10	110	0	20	1.500.000	654347	Hasarlı
Numune 1-3-ALSi10	105	0	20	1.500.000	1500000	Hasarsız
Numune 1-4-ALSi10	110	0	20	1.500.000	818251	Hasarlı

Numunelerin kırılma yüzeylerinde yapılan incelemelerde, gaz boşlukları, porozite kümelenmeleri ve mikroskobik çatlak başlatıcıları gözlemlenmiştir. Bu kusurların yorulma ömrünü önemli ölçüde azalttığı belirlenmiştir.

3.2 SAYISAL ANALİZ SONUÇLARI

Altair SimLab yazılımı kullanılarak gerçekleştirilen sonlu elemanlar analizlerinde, deneysel test koşullarıyla uyumlu yükleme senaryoları uygulanmıştır. Analizler sonucunda elde edilen yorulma davranışı ile deneysel bulgular karşılaştırıldığında belirgin farklılıklar gözlemlenmiştir.

Deneysel çalışmalar sonucunda numunelerin ortalama yorulma limiti 105 MPa olarak tespit edilmiştir. Simülasyon sonuçları ise, aynı gerilme seviyesinde (105 MPa) parçaların istenen çevrime (1.500.000) ulaştığını göstermiştir. Bununla birlikte, 120 MPa seviyesinde yapılan sayısal analizlerde parçaların hedeflenen ömrüne ulaşamadığı belirlenmiştir. Bu bulgular, sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirilen yorulma analizlerinde parçaların yorulma limitinin yaklaşık 120 MPa seviyesinde olduğunu ortaya koymuştur.

Deneysel ve sayısal sonuçlar arasındaki yaklaşık %15’lik farkın temel nedeni, sayısal modellerde malzemenin homojen ve kusursuz kabul edilmesine karşılık, gerçek döküm parçalarında porozite, gaz boşlukları ve mikroyapısal heterojenliklerin yorulma dayanımını düşürmesidir [8–10]. Literatürde de benzer şekilde, döküm kusurlarının hesaba katılmadığı sayısal modellerin deneysel

sonuçlara göre daha yüksek yorulma limitleri verdiği ve %10–20 aralığında sapmaların raporlandığı belirtilmiştir [11–13].

Elde edilen sonuçlar, sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan yorulma analizlerinin genel eğilimi doğru şekilde yansıttığını, ancak döküm alaşımlarına özgü kusurlar hesaba katılmadığında deneysel verilerle uyumlu sonuçların elde edilemediğini göstermektedir. Bu durum, özellikle otomotiv ve havacılık gibi güvenlik kritik uygulamalarda, sayısal modelleme sürecinde mikro yapısal kusurların dikkate alınmasının zorunlu olduğunu ortaya koymaktadır.

4. TARTIŞMA

Bu çalışmada, AlSi7Mg ve AlSi10Mg alaşımlarının yorulma davranışı hem deneysel testler hem de sonlu elemanlar tabanlı sayısal analizlerle incelenmiştir. Deneysel bulgular, her iki alaşım için de ortalama yorulma limitinin yaklaşık 105 MPa seviyesinde olduğunu göstermiştir. Deneylerde kullanılan yükleme oranı ($R = 0,1$), frekans (20 Hz) ve çevrim sınırı (1.500.000 çevrim) sabit tutulmuş olup, bu koşullarda elde edilen sonuçlar, müşteri tarafından belirlenen "sonsuz ömür" kriterini doğrudan yansıtmaktadır. Testler sırasında, 105 MPa seviyesinde bazı numunelerin ömrünü tamamlayabildiği, bazı numunelerde ise erken kırılmaların meydana geldiği görülmüştür. Bu durum, döküm alaşımlarına özgü mikro yapısal heterojenliklerin ve lokal kusurların yorulma ömründe belirleyici rol oynadığını ortaya koymaktadır.

Numunelerin kırılma yüzeylerinde yapılan makroskobik ve mikroskobik incelemelerde, gaz boşlukları, porozite kümelenmeleri ve mikroskobik çatlak başlatıcıları yorulma ömrünü sınırlayan temel unsurlar olarak tespit edilmiştir. Özellikle porozite kümelerinin gerilme yığılmalarına yol açarak çatlak başlama mekanizmasını hızlandığı ve bu nedenle numunelerin ömrünün kısaldığı belirlenmiştir. Bu gözlemler, literatürde rapor edilen çalışmalar ile de uyumludur [8–10].

Sayısal analiz sonuçları ile deneysel bulgular karşılaştırıldığında ise belirgin farklılıklar göze çarpmaktadır. Altair SimLab yazılımı kullanılarak gerçekleştirilen sonlu elemanlar analizlerinde, parçaların 105 MPa gerilme seviyesinde 1.500.000 çevrim ömrüne ulaştığı görülmüş, yani deneysel sonuçlarla büyük oranda uyum sağlanmıştır. Ancak, 120 MPa seviyesinde yapılan sayısal analizler parçaların hedeflenen ömre ulaşmadığını göstermiştir. Bu bulgular, sayısal modellerde tahmin edilen yorulma limitinin yaklaşık 120 MPa seviyesinde olduğunu ortaya koyarken, deneysel çalışmalar ise limitin yaklaşık 105 MPa seviyesinde kaldığını göstermektedir.

Bu iki yöntem arasındaki yaklaşık %15 fark, esasen sayısal modellerde malzemenin homojen ve kusursuz kabul edilmesinden kaynaklanmaktadır. Gerçek döküm parçalarında var olan mikro gözenekler, gaz boşlukları, intermetalik fazlar ve lokal mikroyapı farklılıkları, yorulma dayanımını önemli ölçüde değiştirmekte ve deneysel değerlerin teorik değerlere göre daha düşük çıkmasına yol açmaktadır. Literatürde de benzer şekilde, döküm kusurlarının hesaba katılmadığı sayısal modellerin deneysel sonuçlara kıyasla %10–20 oranında sapma verdiği raporlanmıştır [11–13].

Elde edilen sonuçlar, sayısal analizlerin genel eğilimi doğru şekilde yansıttığını ve yorulma davranışının tahmininde kullanılabilir olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, döküm alaşımlarına özgü kusurların modellemeye entegre edilmediği durumlarda, deneysel verilerle tam uyumlu sonuçların elde edilemeyeceği anlaşılmaktadır. Bu durum, özellikle otomotiv ve havacılık gibi güvenlik kritik uygulamalarda, tasarım aşamasında yalnızca sayısal simülasyon sonuçlarına güvenmenin yeterli olmadığını, mutlaka deneysel verilerle desteklenmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, gelecekte yapılacak çalışmalarda, sayısal modellerde porozite dağılımı, mikro yapı varyasyonları ve yüzey pürüzlülüğü gibi parametrelerin dikkate alınması, daha gerçekçi ömür tahminleri yapılabilmesi açısından kritik önem taşımaktadır.

4. SONUÇLAR

- AlSi7 ve AlSi10 alaşımlarından elde edilen parçaların yorulma limitleri başarıyla belirlenmiştir.
- FEA analizleri ile deneysel sonuçlar arasında yaklaşık %15 fark tespit edilmiştir.
- Bu farkın temel sebebinin, döküm kusurları (porozite, gaz boşluğu) olduğu görülmüştür.
- Yorulma ömür tahminlerinde malzeme kusurlarının mutlaka dikkate alınması gerektiği sonucuna varılmıştır.
- Bulgular, otomotiv ve havacılık endüstrisinde kullanılan döküm alaşımların güvenilirliğini artırmaya yönelik tasarım kriterleri açısından yol göstericidir.

5. REFERANSLAR

- [1] ASM Handbook, Vol. 19: Fatigue and Fracture, ASM International, 1996.
- [2] ASTM E466, Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials, ASTM International, 2007.
- [3] J.G. Kaufman, Aluminum Alloy Castings: Properties, Processes, and Applications, ASM International, 2004.
- [4] L.F. Mondolfo, Aluminum Alloys: Structure and Properties, Butterworths, London, 1976, s.123.
- [5] K. Gall, et al., "Fatigue of Cast Aluminum Alloys," Materials Science and Engineering A, Cilt 319–321, 2001, s. 527–532.
- [6] G.E. Totten, Handbook of Aluminum: Vol. 1 Physical Metallurgy and Processes, CRC Press, New York, 2003.
- [7] D.L. McDowell, "Fatigue Life Prediction of Engineering Alloys," International Journal of Fatigue, Cilt 18, No. 4, 1996, s. 235–243.
- [8] S. Lee, et al., "Effects of Porosity on Fatigue Properties of Cast Aluminum Alloys," Metallurgical and Materials Transactions A, Cilt 33A, 2002, s. 409–419.
- [9] A.M. Samuel, F.H. Samuel, "Porosity Formation in Al–Si Alloys," Journal of Materials Science, Cilt 30, 1995, s. 253–263.
- [10] Q.G. Wang, "Microstructural Effects on the Tensile and Fatigue Properties of Aluminum Casting Alloys A356/357," Metallurgical and Materials Transactions A, Cilt 34A, 2003, s. 2887–2899.
- [11] J.Y. Buffière, S. Savelli, P.H. Jouneau, E. Maire, R. Fougères, "Experimental Study of Porosity and Its Relation to Fatigue Mechanisms of Model Al–Si7–Mg0.3 Cast Alloys," Materials Science and Engineering A, Cilt 316, 2001, s. 115–126.
- [12] K. Gall, M.F. Horstemeyer, D.L. McDowell, J. Fan, "Finite Element Analysis of Porous Microstructures in Cast A356 Aluminum Alloy," Acta Materialia, Cilt 52, 2004, s. 481–496.
- [13] D.L. McDowell, K. Gall, M.F. Horstemeyer, J. Fan, "Microstructure-Based Fatigue Modeling of Cast Al–Si Alloys," Engineering Fracture Mechanics, Cilt 70, 2003, s. 49–80.

HİDROJEN RAYINDA BAĞLANTI BRAKETİ OPTİMİZASYONU ÇALIŞMASI

Ömercan Yürümez¹,

Bosch Sanayi ve Ticaret A.Ş., Yeşil Cadde, No:15 TÜRKİYE
omerca.yurumez@tr.bosch.com¹,

ÖZET

Son yıllarda küresel ısınmanın etkisini azaltmak adına karbon emisyonlarının azaltılması için içten yanmalı motor çalışmaları yapılmaktadır ve yakıt olarak hidrojen kullanılacaktır.

Bu çalışmada hidrojenle çalışan içten yanmalı motorlar için geliştirilen hidrojen rayı bağlantı braketini tasarım optimizasyonu çalışması FEA (sonlu elemanlar analizi) methodu ile yapılmıştır.

Hidrojen soğuk sıcaklıkta tankta depolanmaktadır ve hidrojen rayı içerisinde benzine göre çok soğuk olarak gelmektedir. Motor ise çalışma sıcaklığındadır. Ray ile motor farklı termal genişleme katsayılarına sahip olduklarından dolayı ray üzerinde termal çarpılmaya sebep olmaktadır. Termal yüklerden dolayı oluşan gerilmeyi en düşük seviyeye çekmek için FEA ile DoE çalışması yapılarak tasarım parametrelerinin gerilmeye etkisi incelenmiş, braketin ömür dayanımına en uygun braket tasarımı oluşturulmuştur.

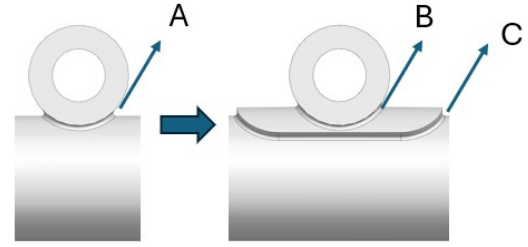
Anahtar kelimeler: Hidrojen, Yakıt rayı, Optimizasyon, FEA, Dayanıklılık, Termal yükler, Stress, Gerilim

1. GİRİŞ

Otomotiv endüstrisi, küresel ısınma ve çevreye etkisini azaltmak adına fosil yakıtlara alternatif olabilecek daha çevreci bir yakıt arayışı içerisinde. Bu bağlamda, hidrojen içten yanmalı motorlarda sürdürülebilir bir yakıt alternatifi olarak değerlendirilmektedir. Hidrojenin motor sistemlerine entegrasyonu, beraberinde yeni tasarım ve mühendislik zorluklarını da getirmektedir. Özellikle yüksek sıcaklık farklarının ve farklı genişleme katsayılarının yol açtığı termal gerilmeler, motor bileşenlerinin ömür dayanımı açısından kritik bir problem oluşturmaktadır.

Mevcut tasarımlar tube ve dairesel braketin lehimlenmesi ile oluşmaktadır. Şekil-1’de gösterildiği tube ya dairesel braketin arasına destek plakası konulduğunda mevcut tasarımdaki bir lehim noktasını (A), iki farklı lehim noktası (B,C) olarak arttırmaktadır. İki farklı lehim noktası gerilimin birbirleri arasında dağıtılarak gerilim seviyelerinin düşmesine yardımcı olur. Bu çözüm

için patent başvurusu yapılmıştır. Başvuru yayınlanmış ve süreç ilerlemektedir.
Patent no : WO 2025/0933S6 A



Şekil-1 Destek Plakası

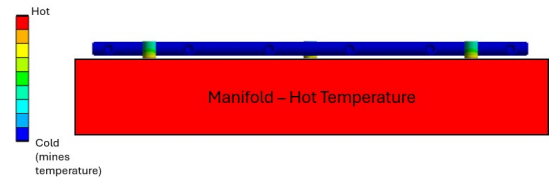
Bu çalışma, hidrojen rayı bağlantı braketinin tasarım optimizasyonuna odaklanarak bu zorlukların üstesinden gelmeyi amaçlamaktadır.

2. YÖNTEM

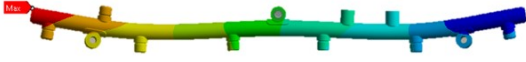
Çalışmada, hidrojen rayı bağlantı braketini üzerinde meydana gelen termal gerilmeleri analiz etmek amacıyla sonlu elemanlar analizi (FEA) yöntemi kullanılmıştır.

Öncelikle ürünün sahada karşılaşılabileceği yükler belirlenmiş ve geliştirme aşamasında bu yükler tasarım sürecine dahil edilmiştir. En kritik yük, soğuk motor çalıştırma ve sonrasında sıcak motor durumudur.

Analizlerde parçalar arasındaki sıcaklık farkı dikkate alınmıştır. Yakıt rayı ve motor üzerindeki sıcaklık dağılımı şekil-2’de gösterilmiştir.



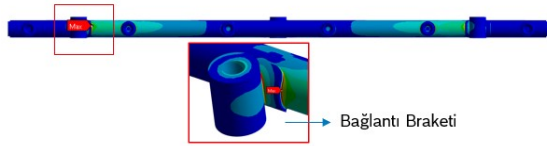
Şekil-2 Sıcaklık dağılımı



Şekil-3 Yakıt Rayı Deformasyon

Sıcaklık farkı ve farklı genleşme katsayıları yakıt rayı üzerinde termal çarpılmaya sebep olmaktadır. Yakıt rayı eksi sıcaklıktan dolayı büzülürken, motor artı sıcaklıktan dolayı genişlemektedir. Yakıt rayı üzerinde oluşan termal çarpılma, deformasyon Şekil-3’de gösterilmiştir. Yakıt rayı bağlantı braketlerinden bükülmektedir.

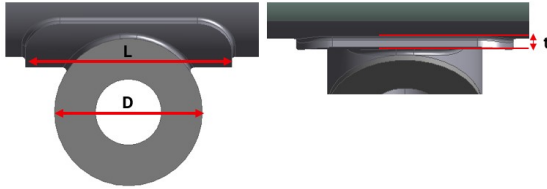
Yakıt rayı üzerinde oluşan deformasyon, yakıt rayı üzerinde gerilim oluşturmaktadır. Bağlantı braket bölgesinde bükülme meydana geldiği için parçadaki en yüksek gerilim bağlantı braket lehim bölgesinde oluşmaktadır. Gerilim dağılımı Şekil-3’te gösterilmiştir



Şekil-4 Yakıt rayı ve bağlantı braketinin Von Mises Gerilim Dağılımı

Termal yüklerin neden olduğu çarpılmaların ve gerilmelerin en aza indirilmesi için bağlantı braketinde DoE (Design of Experiments) yaklaşımı uygulanarak tasarım iyileştirme çalışması yapılmıştır.

DoE çalışmasında değişken parametreler belirlenerek analiz kümesi oluşturulup çözülmüştür. Değişken parametreler Şekil-4’te gösterilmiştir ve uzunluk (L), et kalınlığı(t) ve parça çapı (D) olarak belirlenmiştir.



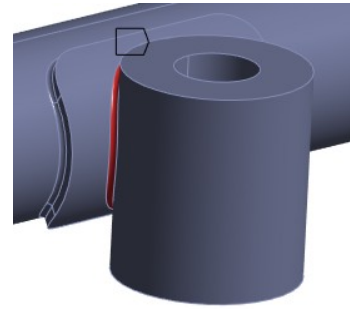
Şekil-4 DoE değişken parametreler

Tablo-1’de değişken parametrelerin aralıkları ve mevcut ölçüsü belirtilmiştir. 27 tasarım noktası oluşturularak DoE simülasyon çalışması yapılmıştır ve bu değişkenlerin braket bağlantısı üzerinde gerilme dağılımlarına etkileri değerlendirilmiştir.

Değişken	Alt limit (mm)	Üst Limit (mm)
D	20	33
L	26	34
t	1	2

Tablo-1 Değişken limitleri

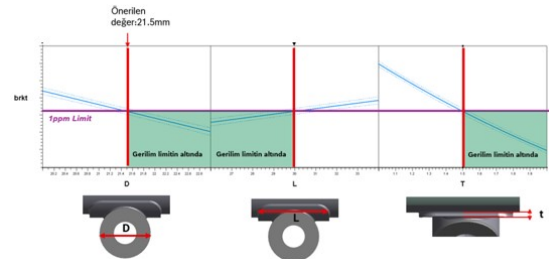
Yapılan FEA ve DoE çalışmaları Şekil5’te gösterilen bağlantı braket lehim bölgesindeki gerilim dağılımı incelenerek yapılmıştır. Paylaşılan sonuçlar bu bölgedeki değerleri kapsamaktadır.



Şekil-5 Değerlendirilen gerilim bölgesi: Bağlantı Braketinin lehim

3. SONUÇLAR

FEA ve DoE çalışması sonucunda hidrojen ray bağlantı braket lehim bölgesindeki gerilme dağılımına tasarım parametrelerinin etkileri değerlendirilmiştir. En uygun ölçü seçilirken, ilgili parametrelerin bütün yakıt rayındaki etkisi dikkate alınmıştır. Bu çalışmada Şekil 5’te belirtilen bölgenin değerlendirilmesi gösterilmiştir.



Şekil-6 Parametre gerilim ilişkisi

Tasarım parametresi, gerilme dağılımı ilişkisi Şekil-6’da gösterilmiştir. Braket çapının (D) ve et kalınlığının (t) artırılması gerilimin düşmesine sebep olurken plaka uzunluğunun (L) artması gerilimin yükselmesine sebep olmaktadır.

Parametre değişikliğinin parça maliyetine etkisi ve yakıt rayı üzerinde diğer bölgelerdeki gerilme dağılımı değişikliği dikkate alınarak sadece çap değişikliği yapılarak diğer ölçülerin korunması en uygun sonucu vermektedir.

Braket çapı 20mm'de 21.5mm yapılarak braket lehiminde gerilim %15 oranında düşürülmüştür

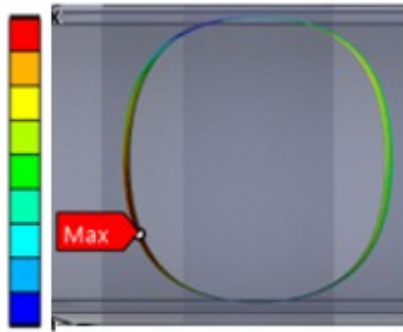
4. REFERANSLAR

- [1] Cornerstone Fundamentals-2023
- [2] ANSYS Inc. (2023). *ANSYS Mechanical User's Guide*. ANSYS Inc.
- [3] R. L. Mott, J. Vavrek, and S. Wang, *Machine Elements in Mechanical Design*, 6th ed. Pearson, 2018

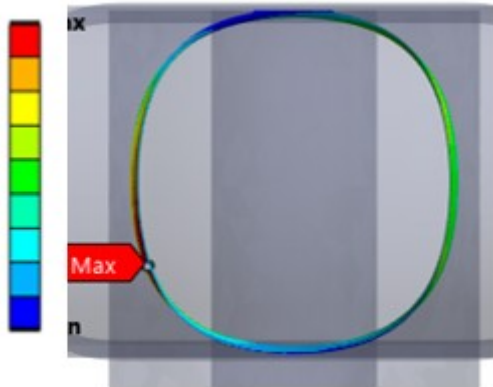
Sonuç olarak DoE çalışmasının çıktısı olarak uygun parametre maliyet ve gerilim limit değeri açısından değerlendirilerek diğer iki parametre değiştirilmeyerek braket çapı (D) 21.5 olarak aday ölçü belirlenmiştir.

Bracket Çapı	Gerilim Değişimi
D:20mm	-
Aday D:21.5	%15 düşüş

Tablo-2 Gerilim değeri karşılaştırması



Şekil-8 Mevcut tasarım braket lehim gerilim dağılımı



Şekil-8 Aday tasarım braket lehim gerilim dağılımı

HİDROJEN ENJEKTÖRÜ DİSTRİBÜTÖR PARÇASINDA BASINÇ KAYBI OPTİMİZASYONU VE ÜRETİM PROSESLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Eren Bahçeci

Bosch Sanayi ve Ticaret A.Ş., Yeşil Cadde, No:15 TÜRKİYE
eren.bahceci@tr.bosch.com

ÖZET

Bu çalışmada, hidrojen enjektörlerinde yaşanan basınç kayıplarının nedenleri incelenmiş ve bu kayıpların minimum seviyeye indirilmesi amacıyla tasarım optimizasyonu yapılmıştır. Hidrojen enjektörlerinde, giriş basıncı sistemsel analizler sonrası sabit bir değerde belirlenmiş olup, distribütör parçasındaki basınç düşüşleri, enjektör performansını doğrudan etkilemektedir. Bu kapsamda, distribütör parçasının delik geometrileri ve birleşim noktalarındaki akış karakteristikleri CFD analizleri ile değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında, distribütör parçasının montaj ve çalışma koşulları dikkate alınarak boyutlandırılması yapılmış, delik çap ve uzunlukları optimize edilerek akış girdapları tespit edilmiştir. Ayrıca, merkez delik ve yanal deliklerin birleşim noktalarında oluşan basınç düşüşlerinin azaltılması için yüzey yumuşatma ihtiyaçları belirlenmiş, radyus oluşturma denemeleri gerçekleştirilmiş ve bu denemelerden elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Hidrojen enjektörü, Basınç kaybı, CFD, Arge, Tasarım, Optimizasyon

1. GİRİŞ

Karbon emisyonlarının azaltılması üzerine alınan kararlar ve yürütülen çalışmalar, önemli bir gündem maddesi haline gelmiştir. Bu alanda birçok ülke araçların karbon emisyonu üzerine birçok katı kural getirmeyi planlayıp petrol harici yakıtların kullanımı için ana sanayilerin çabalarını destekleyici birçok karar almıştır. Elektrikli araçlar, araç emisyonlarını azaltmada etkili bir çözüm olmasına rağmen, hidrojen, doğada en bol bulunan element olması ve çevreye herhangi bir zararlı etkisinin olmaması açısından mevcut yakıtlarla rekabet edebilecek tek yakıt olarak otomotiv dünyasında kabul görmeye başlamıştır.

İçten yanmalı motorların hidrojen yakıtıyla çalışabilmesi amacıyla enjektör sistemlerinin geliştirilmesine yönelik bir çalışma başlatılmıştır. Bu kapsamda, mevcut üretim hatları ve proses olanaklarının azami ölçüde değerlendirilmesi

hedeflenmektedir. Ancak hidrojenin gaz fazında bulunması, geleneksel benzinli enjektör sistemlerinden farklı mekanik yapıların tasarlanmasını ve buna uygun üretim proseslerinin yeniden yapılandırılmasını gerektirmektedir.

Çoğunlukla uluslararası arenada hidrojen yakıtının akış davranışı ve malzemedeki yapışma vb. karakteristikleri bilinmemekte ve istenmeyen basınç düşüşleri ortaya çıkabilmektedir. Bu çalışmada amaç basınç düşüşlerinin belirlenmesi, geometri optimizasyonunun yapılması ve istenen geometriye ulaşabilmek için en iyi proses yönteminin seçilmesiyle beraber şirket içinde bu araçların seriye uygun hale getirilmesidir.

2. TASARIM OPTİMİZASYONUNDAKİ MOTİVASYON

Bu çalışmada, hidrojen enjektör sisteminde distribütör parçası kaynaklı basınç kayıpları incelenmiş ve bu kayıpların minimize edilmesine yönelik geometrik optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Enjektör giriş basıncı 40 bar olarak belirlenmiş olup, distribütör parçası, yakıt borusundan gelen hidrojeni enjektör içerisine yönlendirmektedir. Bu süreçte meydana gelen basınç düşüşü, enjektör çıkışına kadar devam etmekte ve püskürtme performansını olumsuz yönde etkilemektedir. Bu nedenle, distribütör parçasındaki basınç kaybının mümkün olduğunca düşük tutulması hedeflenmiştir.

İlk olarak, bir adet merkezi ve bir adet yanal delikten oluşan bir geometri tasarlanmıştır. Hidrojen, bu yanal deliklerden enjektör içerisine akmakta; ancak akış öncesinde çeşitli yüzeylerle etkileşime girerek basınç kaybına uğramaktadır. Bu bağlamda, çalışmada basınç kaybına neden olan unsurlar tanımlanmış; delik geometrisinin optimizasyonu ANSYS CFD yazılımı kullanılarak simüle edilmiştir. Ayrıca, delik birleşim noktalarında yüzey yumuşatma karakteristikleri belirlenmiş ve bu karakteristiklere ulaşmak için gerekli proses adımları test edilerek netleştirilmiştir.

Başlangıçta Şekil 1'de gösterilen karmaşık bir geometri tasarlanmış; ancak bu yapı, parça uzunluğu ve işleme zorlukları nedeniyle yüksek üretim maliyetine yol açmıştır. Bu nedenle, Şekil

2’de gösterilen daha sade bir yapıya geçilmiştir. Ancak bu yeni yapıda, hidrojenin doğrudan karşı duvara çarpması sonucu lokal birikme(kırmızı bölge) ve buna bağlı olarak belirgin bir basınç düşüşü gözlemlenmiştir. Bu nedenle, Şekil 1’deki basınç performansını hedefleyen bir optimizasyon süreci başlatılmış ve yeni tasarım üzerinde iyileştirmeler yapılmıştır.

çalışmaları sonucunda belirlenmiştir. (Tablo1) Farklı delik çapları için gerçekleştirilen CFD analizleri sonucunda, Şekil 3’de görülebileceği üzere delik çapı arttıkça basınç düşüşünün azaldığı gözlemlenmiştir. Ancak D=Ø1.4x çapında girdap oluşumunun başladığı tespit edildiğinden, optimum çap D=1.3x olarak seçilmiştir.

Şekil 1. Üretimi maaliyetli olan tasarım ve basınç düşüş analizi

Şekil 2. Üretim maaliyeti düşük ancak basınç düşüşü optimize edilmesi gereken tasarım ve basınç analizi

3. GEOMETRİ OPTİMİZASYONUNDAKİ MOTİVASYON

Basınç düşüşünü azaltmak amacıyla; delik çapı, delik uzunluğu, delik delme yöntemi ve çapraz deliklerde çapak alma gibi parametreler detaylı şekilde ele alınmıştır. Her varyant için ayrı bir tasarım oluşturulmuş ve ilgili tasarımlar üzerinde CFD analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen analiz sonuçları doğrultusunda en uygun geometrik yapı belirlenmiş ve nihai tasarım kararları verilmiştir.

3.1 Delik Çapının Etkisinin İncelenmesi

Proje başlangıcında, sistem gereksinimlerinden kaynaklı olarak Y çapı sabitlenmiş; D çapı ise yapılan optimizasyon

$$\text{ØY} = \text{Ø1.4x}$$

Tablo 1. Farklı delik çapları ve bu çapların basınç düşüşüne etkisi



Şekil 4. CFD simülasyon sonuçları ve girdap etkisi

3.2 Delik uzunluğunun incelenmesi

Şekilde 5 görüldüğü üzere delik uzunluğunun etkisi için de çeşitli varyantlar denenmiş olup optimum uzunluk olarak daha uzun varyant seçilmiştir.

Şekil 5. Delik uzunluğunun basınç düşüşüne etkisi

üretime uygunluğu analiz edilmiştir. Denenen prosesler aşağıda sıralanmıştır:

- i. CNC tezgahında Heule takımı kullanılarak radyus oluşturma denemesi

3.3 Delik delme metodunun incelenmesi

Delik delme yönteminin etkilerini değerlendirmek amacıyla, açılı uç ve yuvarlatılmış uç gibi farklı takım uçları incelenmiştir. Yapılan gözlemler sonucunda, yuvarlatılmış uçların delik uç kısmında daha düzgün ve akışa uygun bir bitiş sağladığı belirlenmiştir; bu nedenle en uygun takım ucu olarak yuvarlatılmış uçlar tercih edilmiştir.(Şekil 6)

Şekil 6. Delik delmede kullanılan kesici uçların etkisinin incelenmesi

3.4 Çapraz deliklerde radyus işleminin etkisinin incelenmesi

Çapraz delik kesişim bölgesinde uygulanan radyus işleminin, hedeflenen basınç düşüşü değerine ulaşmada kritik bir rol oynadığı gözlemlenmiştir. Farklı radyus değerleri üzerinde yapılan denemeler sonucunda, optimum radyus değeri belirlenerek akış performansı iyileştirilmiştir.(Şekil 7)

Şekil 7. Farklı radyus değerleri ve bunların basınç düşüşü üzerine etkisini gösteren CFD sonuçları

Delik birleşim noktalarında hedeflenen radyus geometrisinin üretilmesi amacıyla çeşitli yöntemler denenmiş ve bu yöntemlerin çıktıları detaylı şekilde değerlendirilmiştir. Bu değerlendirme sürecinde, hem istenen geometrik şekle ulaşıp ulaşılmadığı hem de yöntemlerin seri

Şekil 8. Deliğe girerken kapalı deliğe girdikten sonra ucunda açılabilen kesici olan Heule kesici takımı

- ii. CNC tezgahında Back-Burr Cutter takımı ile radyus oluşturma denemesi

Şekil 9. Back-Burr Cutter kesici takımı denemesi ve ikincil çapakların oluşumu

- iii. CNC tezgahında çeşitli fırça grupları ile radyus oluşturma denemesi

Şekil 10. Çeşitli sertlikteki fırçalarla yapılan yüzey yumuşatma denemesi

- iv. ECM (Electrochemical Machining) yöntemi ile radyus oluşturma denemesi



Şekil 11. ECM fikstürü ve yüzey yumuşatma görüntüsü

Delik kesişim bölgesine uygulanmak istenen radyus değerinin en optimum olarak ECM metodu ile sağlanabildiği görülmektedir (Şekil 11). Diğer proseslerde istenmeyen çapaklar(Şekil 10), seri üretime uygunsuzluk(Şekil 8), istenen geometriyi sağlayamama(Şekil 10) gibi nedenlerden dolayı uygulanamaz olduğu görülmüştür.

Gerekli olan ECM (Elektrokimyasal İşleme) prosesi için gerekli üretim araçlarının tasarlanması ve parçadaki istenen ölçülere uyulmasıyla yaşanan basınç kaybının ortadan kaldırılması ile istenen geometriye ulaşılmıştır.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada hidrojen enjektör sistemlerinde distribütör parçası kaynaklı basınç kayıpları ayrıntılı olarak incelenmiş ve bu kayıpların minimize edilmesi amacıyla çeşitli geometrik optimizasyonlar gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler, distribütör geometrisinin enjektör performansı üzerinde kritik bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Özellikle delik çapı, uzunluğu ve birleşim noktalarındaki akış karakteristikleri, sistemde meydana gelen basınç düşüşünü doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle, geometrik tasarım parametrelerinin sistematik olarak değerlendirilmesi ve CFD tabanlı optimizasyon sürecine dahil edilmesi, basınç kaybının kontrol altına alınabilmesi açısından büyük önem taşımaktadır.

Çalışma kapsamında yapılan CFD analizleri, delik çapı arttıkça basınç kaybının azaldığını, ancak belirli bir kritik değerden sonra akışta girdapların oluştuğunu ortaya koymuştur. Bu durum, yalnızca basınç kaybının azaltılmasına değil, aynı zamanda akışın kararlılığının korunmasına da dikkat edilmesi gerektiğini göstermektedir. Benzer şekilde, delik uzunluğunun artırılmasının basınç kayıplarını

azaltıcı etkisi bulunmuş; ancak imalat kabiliyeti ve montaj kolaylığı göz önüne alınarak optimum bir değer seçilmiştir. Ayrıca delme yöntemleri incelendiğinde, yuvarlatılmış uçlu takımların akışa daha uygun bir yüzey kalitesi sunduğu ve buna bağlı olarak daha düşük basınç kaybı sağladığı belirlenmiştir.

Önemli bulgulardan biri de delik birleşim bölgelerindeki akış karakteristiği olmuştur. Çapraz delik kesişimlerinde keskin kenarların basınç kaybını artırdığı, buna karşılık radyus uygulamalarının akış performansını belirgin şekilde iyileştirdiği görülmüştür. Bu amaçla farklı yöntemler denenmiş, ancak seri üretime uygunluk, yüzey kalitesi ve geometrik hassasiyet kriterleri göz önüne alındığında en etkin çözümün ECM (Electrochemical Machining) yöntemi olduğu sonucuna varılmıştır. ECM prosesi ile elde edilen yüzey kalitesi sayesinde hedeflenen radyus değerine ulaşılmış ve akış performansı anlamlı ölçüde geliştirilmiştir.

Sonuç olarak, yapılan optimizasyon çalışmaları sayesinde hidrojen enjektörlerinde basınç kaybı önemli ölçüde azaltılmış, püskürtme performansı iyileştirilmiş ve üretime uygun bir tasarım ortaya konmuştur. Bu bulgular, hidrojen yakıtlı içten yanmalı motorların verimli ve güvenilir çalışmasına katkı sağlayarak, karbon emisyonlarının azaltılması yönündeki küresel hedeflere destek sunmaktadır. Ayrıca çalışma, gelecekte hidrojen enjektörlerinin tasarımı ve üretimi konusunda yapılacak araştırmalara yol gösterici nitelikte olup, hem akademik hem de endüstriyel alanda uygulanabilir sonuçlar ortaya koymaktadır.

5. REFERANSLAR

- [1] Yip, H. L.; Srna, A.; Yuen, A. C. Y.; Kook, S.; Taylor, R. A.; Yeoh, G. H.; Medwell, P. R.; Chan, Q. N. "A Review of Hydrogen Direct Injection for Internal Combustion Engines: Towards Carbon-Free Combustion" Applied Sciences, Cilt 9, Sayı 22, 2019, Makale No 4842.
- [2] Mancaruso, E.; Catapano, F.; Rossetti, S.; Anacleto, G.; Camporeale, S.; Episcopo, D.; Laera, D.; Torresi, M. "High Pressure Hydrogen Injector Sizing Using 1D/3D CFD Modeling for a Compression Ignition Single Cylinder Research Engine" SAE Technical Paper Series, 2024, Paper No. 2024-01-2615
- [3] Goyal, H.; Jones, P.; Bajwa, A.; Parsons, D.; Akehurst, S.; Davy, M. H.; Leach, F. C. P.; Esposito, S. "Design Trends and Challenges in Hydrogen Direct Injection (H2DI) Internal Combustion Engines – A Review" International Journal of Hydrogen Energy, Cilt 86, Sayı 65, 2024, s.1179-1194
- [4] Deburring of Cross-Drilled Holes with Ball-End Cutters – Modeling the Tool Path" Computer-Aided Engineering / Uluslararası İmalat Teknolojisi Bildirisi
- [5] I.H. Choi, "A Study of the Characteristics of the Electrochemical Deburring of a Governor-Shaft Cross Hole" Journal of Materials Processing Technology, Cilt 75, Sayı 2-3, 1998, s.198-203

BENZİNLİ ENJEKTÖRLERDE BASINÇ YÜKLERİ VE BUNA BAĞLI YORULMA ÖMÜR HESAPLAMALARI

Hüseyin Barış Küsülü

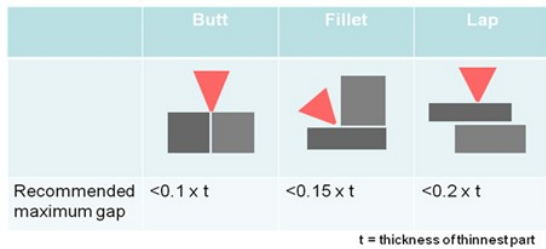
Bosch Sanayi ve Ticaret A.Ş., Eflatun Cadde, No:19, BURSA
baris.kusulu@tr.bosch.com

Özet- Bu çalışmanın amacı, benzinli enjektörlerin kullanım ömürleri boyunca maruz kalacakları basınç değişimlerinin, benzinli enjektörün araca biçilen ömrü boyunca etkilerini incelemektir. Bunun için kapsamlı bir yorulma analizi gerçekleştirilmektedir ve bu analiz, benzinli enjektörün kullanılacağı aracın sahip olduğu farklı teknolojilere (hibrit, start-stop) göre değişkenlik gösterebilmektedir. Çalışmada, gerçek ve sentetik yükleme koşulları altında benzinli enjektör için yorulma değerlendirilmesi gerçekleştirilmiştir. Bu değerlendirme için gereken SN eğrisi ve ömür testi sonuçlarıyla kıyaslanmasına yönelik bazı detaylara yer verilmiştir.

Yorulma Analizi, SN Eğrisi, Ömür, Dayanım, Benzinli Enjektör

1. GİRİŞ

Benzinli enjektörler, tüp formunda ve birbirinden farklı olabilecek malzemelerin lazer kaynağı ile birleştirilmesiyle üretilmektedir. Her bir lazer kaynağının formu ve parametreleri birbirinden farklı olabilir, maruz kaldığı yükleme koşuluna göre tasarlanmaktadır. (Şekil 1)



Şekil 1 – Lazer Kaynak Kesit Örnekleri [1]

Benzinli enjektörler, çalışma ömürleri boyunca sıcaklık, titreşim, basınç, korozyon gibi enjektör fonksiyonunu etkileyebilecek yükleme koşullarına maruz kalmaktadır. Birbirinden farklı niteliklere sahip binek araçlarda kullanılan benzinli enjektörlerin, bu yükleme koşullarına ömrü boyunca gerekli dayanımı göstermesi

gerekmektedir. Bu sebeple, farklı binek araçlarda kullanılan her bir benzinli enjektör tasarımının, geliştirme aşamasında bir dizi testi başarıyla tamamlaması gerekmektedir. Bu sebeple konstrüksiyonun dayanımının ve yorulma ömrünün, kullanılacak olan araçta ömrü hayatı boyunca maruz kalacağı basınç yükleme koşulu kullanılarak yorulma analizlerinin araç seri hayata geçmeden önce tamamlanması gerekmektedir.

2. ÇALIŞMALAR

Enjektörün araçta maruz kalacağınız basınç yüklere dayalı yorulma analizi için gerçekleştirilen çalışmaları üç ana başlıkta incelemek mümkündür;

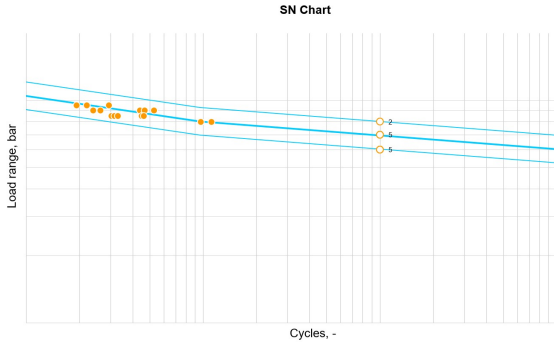
2.1 Hidropuls Test ve SN Eğrisinin Elde Edilmesi

Benzinli enjektör konstrüksiyonunun SN eğrisinin elde edilmesi, enjektör ömrünün tayin edilebilmesi için kritik önem taşır. Seri üretimdeki koşullarında üretilmiş enjektörler, kullanılacağı araçtakiyle aynı şekilde fikstüre sabitlenerek farklı basınç seviyelerinde döngüsel olarak basınçlandırılırlar. (Şekil 2) Beklendiği üzere, yüksek basınç seviyelerinde enjektörler daha düşük sayılardaki döngülerde çatlama eğilimi gösterirken, basınç değeri azaldıkça enjektörlerin çatlama karşı gösterdiği direnç daha yüksek sayılar boyunca etkili olabilir. Test maliyetleri ve testin uygulama süresi göz önüne alındığında, belirli bir sayıda döngü tamamlandıktan sonra test durdurulur.



Şekil 2 - Hidro Puls Test Düzeneği

Tek bir basınç seviyesinde birden fazla enjektör test edilir. SN eğrisinin elde edilmesi için, farklı basınç seviyelerinde test tekrarlanır. Test sırasında bazı enjektörlerde çatlaklar oluşur. Bu çatlaklar, teste basınçlandırma sırasında basınç kayıplarından tespit edilir. Çatlak oluşan enjektör test cihazından çıkarılır ve henüz çatlak oluşmayan enjektörler teste devam ederler. Bazı basınç seviyelerinde, özellikle çok yüksek basınçlarda, tüm enjektörlerde çatlak oluşur. Bazı basınç seviyelerinde test tamamlandığında bazı enjektörlerde çatlak gözlemlenirken, bazı enjektörler ise testi çatlaksız tamamlayabilir. Son olarak, bazı basınç seviyelerinde ise hiçbir enjektörde çatlak gözlenmez. SN eğrisinin oluşturulmasında bu üç test sonucu da kullanılır ve SN eğrisinin hassasiyeti için önem taşır. Arka planda istatistiksel hesapların kullanılması ile SN eğrisi tayin edilmiş olur. (Şekil 3)



Şekil 3 - HPT Sonucu ve SN Eğrisi

2.2 Basınç Ömür Yüğü

Benzinli enjektörler, kullanıldıkları aracın sahip olduğu özelliklere göre farklı basınç ömür yüküne maruz kalırlar. Toplam basınç yükü, iki ana kategoriden oluşmaktadır;

- Araç basınç yük ölçümü
- Sentetik yükler

2.2.1 Araç Basınç Yük Ölçümü

Aracın proje sonunda nihai haline en yakın nitelikte üretilmesi sonrası şehir içi, otoyol ve kırsal gibi

farklı yol koşullarında belirli rotalarda sürülmesi sırasında, aracın yakıt borusundaki basınç değişimleri kaydedilir. 100-150 km'lik bu toplam sürüşle yapılan ölçüm çalışması sonrası, elde edilen basınç değişimleri belirli hesaplamalarla aracın bütün ömrü boyunca (240.000 km-300.000 km gibi) oluşabilecek döngüsel basınç yüküne dönüştürülür.

2.2.2 Sentetik Yükler

Bazı basınç değişimleri, araçta oluşabilecek hata modları sebebiyle oluşmaktadır. Dolayısıyla, özellikle aracın yakıt pompasından kaynaklı hata modları sentetik yük olarak herhangi bir ölçüm yapılmadan, bilgi birikimine dayalı olarak dikkate alınır.

Soğuk hava koşulları ve sıcak motorun tekrar çalıştırılması gibi araç basınç ölçüm test maliyetini etkileyen koşullar da bilgi birikimine dayalı olarak hesaplamalara dahil edilir.

Son olarak, aracın start stop, hibrit gibi farklı teknolojilere sahip olması, araç sürüşü esnasında yakıt yolundaki basınç dalgalanmalarına doğrudan etki etmektedir. Bu teknolojilerin araç basınç ölçüm test maliyetini artırması ve süreci uzatması sebebiyle, araç basınç ölçümü sırasında ölçülmesi yerine, bilgi birikimine dayalı olarak dikkate alınır.

2.2.3 Nihai Basınç Yüğü

Araç basınç yük ölçümü sonrası araca tanımlanan ömre karşılık basınç yükü ve sentetik yüklerin birbirine eklenmesiyle, ilgili araca ait döngüsel basınç yükü elde edilmiş olur. (Tablo 1)

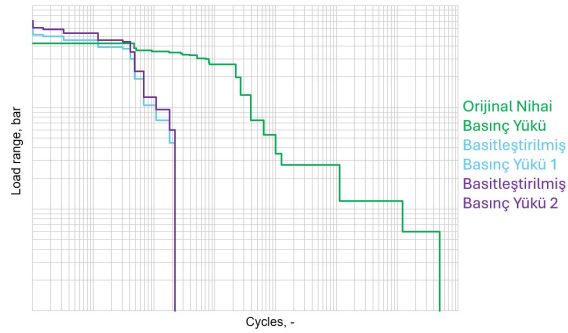
Tablo 1 - Nihai Basınç Yüğü

	Basınç Yük Tanımı	Döngü	Düşük Basınç	Yüksek Basınç
Sentetik Yükler	Hata Modu 1	Döngü 1	DB1	YB1
	Hata Modu 2	Döngü 2	DB2	YB2
	Sıcak Çalıştırma 1	Döngü 3	DB3	YB3
	Sıcak Çalıştırma 2	Döngü 4	DB4	YB4
	Soğuk Çalıştırma 1	Döngü 5	DB5	YB5
	Soğuk Çalıştırma 2	Döngü 6	DB6	YB6
	Start Stop 1	Döngü 7	DB7	YB7
	Start Stop 2	Döngü 8	DB8	YB8
	Hibrit 1	Döngü 9	DB9	YB9
	Hibrit 2	Döngü 10	DB10	YB10
Araç Basınç Yük Ölçümü	Operasyon 1	Döngü 11	DB11	YB11
	Operasyon 2	Döngü 12	DB12	YB12
	Operasyon 3	Döngü 13	DB13	YB13
	Operasyon 4	Döngü 14	DB14	YB14
	Değişim 1	Döngü 15	DB15	YB15
	Değişim 2	Döngü 16	DB16	YB16
	Değişim 3	Döngü 17	DB17	YB17
	Değişim 4	Döngü 18	DB18	YB18

2.3 Ömür Testi ve Hasar Oranı

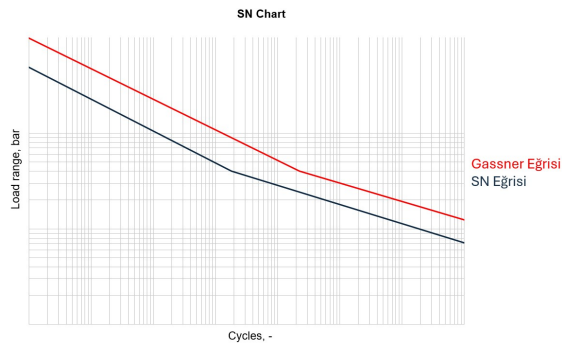
Bölüm 2.2'de edilen nihai döngüsel basınç yükünü laboratuvar ortamında enjektörlere uygulayıp test

etmek mümkündür ancak bu testin maliyeti ve süresi çok uzun olacaktır. Bu sebeple, toplam basınç yükündeki basınç değerlerinin belirli bir katsayıyla çarpılarak artırılması ve buna paralel olarak döngü sayılarının düşürülmesiyle test edilmesi mümkün bir basınç yükleme profili elde edilir. Aynı işlem, birden çok farklı katsayıyla tekrar edilerek birbirinden farklı basitleştirilmiş basınç yükleri elde edilir ve basitleştirilmiş basınç yükü döngüleri ayrı ayrı test edilir. Nihayetinde, Gassner eğrisi elde edilir ve bu eğriden elde edilen hasar hesaplamalarıyla, ilgili tasarıma ait hasar oranı elde edilir. (Şekil 4)



Şekil 4 - Nihai Basınç Yükü ve Basitleştirilmiş Basınç Yükleri

Gassner eğrisi, her bir enjektör tasarımı için tekrar tekrar elde edilmez. Bunun yerine, birbirinden farklı araçların her birine ait basınç yükünü kapsayıcı bir ana bir basınç profilinden yola çıkarak Gassner testi elde edilir. Bu testte elde edilen çatlak döngü sayıları ve basınç seviyeleri kullanılarak, enjektöre ait hasar oranı elde edilir.



3. HASAR BİRİKİMİ ve YORULMA ANALİZİ

Hidropuls testle elde edilen SN eğrisi ve araca ait nihai basınç yükü kullanılarak, ilgili projeye ait hasar birikimi hesaplanabilir. Bu hesaplardan elde edilen sonucun, bilgi birikiminden gelen hasar oranına göre log-normal dağılım üzerinden kıyaslama ve hesaplanmasıyla ppm değerine ulaşmak mümkündür.

4. SONUÇ

Lazer kaynaklı konstrüksiyondan oluşan benzinli enjektörler, yüksek basınç değişimlerine karşı yüksek dayanıma sahip olması gereken ürünlerdir. Nihai basınç yüklerinin tamamını kapsayıcı nitelikte bir basınç yük profili kullanılarak Gassner testi ve test sonrasında Gassner eğrisi belirlenir. Geliştirme aktivitesi devam eden enjektöre ait SN eğrisi, hidro puls testinin farklı basınç seviyelerinde test edilmesiyle elde edilir. Araç basınç ölçümünden elde edilen basınç yükü ve sentetik yüklerin birbirine eklenmesiyle, nihai basınç yükü oluşturulur. Nihai basınç yükü ve SN eğrisi kullanılarak yorulma hasar birikimi elde edilir ve hasar birikimi sonucu, Gassner eğrisi ve Gassner testi yükleri kullanılarak elde edilen hasar birikimi sonucuyla kıyaslanır. Bu kıyaslama sonucu ppm değeri elde edilir. Ppm değerinin limit değerin altında kalması durumunda proje aktivitelerinin sonraki aşamalarına geçilir.

3. REFERANSLAR

[1] Glover, S. (2016, Temmuz). *Figure 2-2: Laser welding fundamentals*. LaserChirp. https://www.laserchirp.com/2016/07/laser-welding-fundamentals/figure_2-2/

BENZİNLİ ENJEKTÖR TÜPÜNÜN OPTİMİZE EDİLMİŞ KOMPAKT TASARIM PROJESİ

Hakan Türkmen¹, Gökhan Güvenç²

Bosch Sanayi ve Ticaret A.Ş., Yeşil Cadde, No:15 TÜRKİYE
hakan.turkmen@tr.bosch.com¹, gokhan.guven@tr.bosch.com²

ÖZET

Günümüzde otomotiv sektöründeki küresel eğilimler, düşük emisyon, yüksek yakıt verimliliği ve uzun ürün ömrünü birlikte sağlayabilecek motor teknolojilerini ön plana çıkarmaktadır. Bu bağlamda benzinli motorlarda kullanılan yüksek basınçlı enjektörler, performans ve çevresel kriterler açısından kritik bileşenlerdir. Yeni geliştirilen kompakt tasarım ve optimizasyon projesinde geliştirilen enjektörlerde validasyon süreçlerinde gözlemlenen sızdırmazlık ve dayanıklılık problemleri, bu çalışmanın çıkış noktasını oluşturmuştur. Çalışmada tasarım parametrelerinin yeniden değerlendirilmesi, sayısal simülasyon ve deneysel testlerle desteklenmiş; dayanımı artırılmış, üretime uyumlu ve global pazara uygun bir enjektör çözümü geliştirilmiştir.

Anahtar kelimeler: Benzinli enjektör, Optimizasyon, Kompakt tasarım, Dayanıklılık, Sızdırmazlık, Üretime uygunluk

1. GİRİŞ

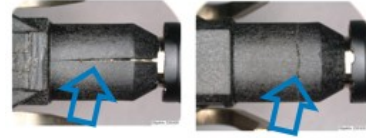
Otomotiv endüstrisi, giderek sıkılaşan emisyon normları ve müşteri beklentileri doğrultusunda daha dayanıklı, verimli ve güvenilir motor bileşenlerine ihtiyaç duymaktadır. Doğrudan enjeksiyonlu motorlarda kullanılan yüksek basınçlı benzin enjektörleri, hem performans hem de çevresel etkiler açısından stratejik öneme sahiptir.

Enjektörü doğrulamak için gerçekleştirilen testler, özellikle sızdırmazlık ve dayanıklılık problemleri nedeniyle optimizasyon gerekliliğini ortaya koymuştur. Bu çalışma, söz konusu problemlerin çözülmesi, enjektörün dayanıklılığının artırılması ve global pazarlarda rekabet avantajı sağlanması amacıyla yürütülmüştür.

2. YÖNTEM

Enjektör, 350 bar basınç altında çalışmakta olup yakıt, hidrolik bağlantı noktasından geçerek sızdırmazlık elemanları üzerinden püskürtme bölgesine aktarılmaktadır. Çalışmada gözlemlenen plastik çatlakları, ısıl döngü/şok testi sırasında

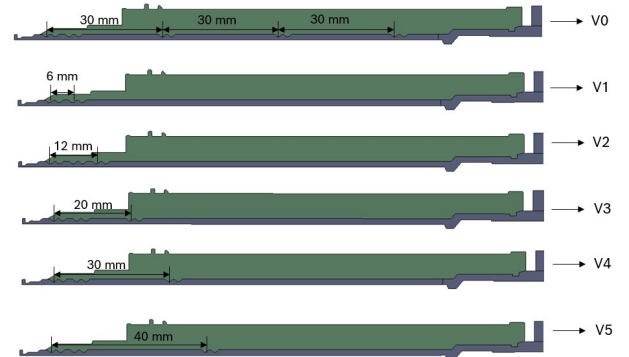
uygulanan hızlı, düşük ve yüksek sıcaklık geçişlerinin bir sonucu olarak meydana gelmiştir. Test öncesinde enjektör üzerinde gerçekleştirilen ön yaşlandırma (pre-aging) testi, plastik malzeme içerisinde nem birikimine yol açmıştır. Termal şok sırasında bu nem, genleşme ve büzülme stresleri ile birleşerek malzemede çatlak oluşumunu tetiklemiştir. Çatlaklar, Şekil 1'de açıkça gözlemlenebilmektedir.



Şekil 1. Enjektörde termal genleşmeye bağlı farklı çatlak oluşumları

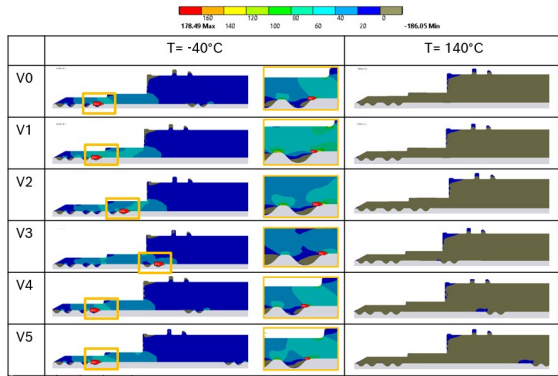
Plastik malzeme içerisinde gözlemlenen nem etkisi ve termal genleşmeye bağlı çatlak oluşumları (Şekil 1), tasarımsal optimizasyon ihtiyacını doğurmuştur. Mevcut tasarım varyantları ölçüsel olarak karşılaştırılmış ve simülasyonlar ANSYS FEM modülünde termal simülasyonlar -40°C ile 140°C arasında gerçekleştirilmiştir.

Çatlakın oluşum ve gelişim davranışını inceleyebilmek amacıyla, mevcut tasarım ve olası alternatif tasarım çözümleri üzerinde simülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2. Alternatif tasarım önerileri (versiyon 1, versiyon 2, versiyon 3, versiyon 4, versiyon 5)

Oluşturulan farklı tasarım önerileri, enjektörün validasyonu için kullanılan test koşulları referans alınarak simülasyon ortamına aktarılmış ve uygun simülasyon set-up'ı kurulmuştur.



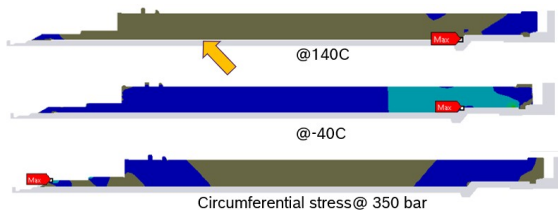
Şekil 3. Simülasyon sonuçları

Mevcut tasarımda kanallı destek bölgelerinde maksimum 196 MPa gerilim gözlemlenmiştir. Kanal sayısının artırılmasıyla bu gerilim değeri 119 MPa seviyelerine düşürülmüştür. Ayrıca, belirli mesafelerde farklı kanal tipleri değerlendirilerek kritik bölgelerdeki gerilim azaltılmış ve böylece optimum tasarım elde edilmiştir.

	-40°C	140°C
X	186	22
Y	196	35
V0	123	-29
V1	178	-72
V2	176	-68
V3	119	-47
V4	129	-53
V5	151	-59

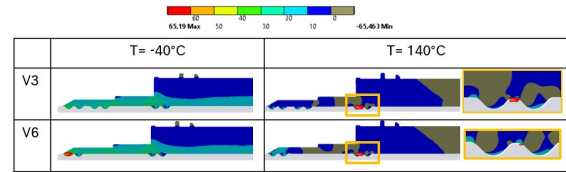
Tablo 1. Farklı tasarım varyasyonlarında düşük ve yüksek sıcaklık koşullarında elde edilen gerilim değerleri (MPa).

Ek olarak, tüp üzerindeki kanallar kaldırılarak alternatif bir tasarım önerisi geliştirilmiştir. Bu yaklaşımın amacı, özellikle termal genleşme ve büzülme sırasında plastik malzemenin daha serbest hareket edebilmesini sağlamak ve kanalların neden olduğu boğazlamayı ortadan kaldırmaktır. Ancak simülasyon sonuçları, kanallar kaldırıldığında termal genleşme sırasında plastik ve tüp arasında boşluğun artarak malzemelerin birbirinden ayrıldığını göstermiştir.



Şekil 4. Yüksek sıcaklık koşullarında, termal genleşme etkisiyle tüp ve plastik malzemenin birbirinden ayrılması (MPa)

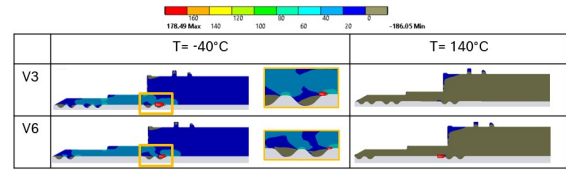
Oluşturulan alternatif tasarım önerisinin simülasyon sonuçları, kritik bölgelerde gerilim seviyelerinde belirgin bir düşüş sağladığını göstermiştir. Ardından, bu tasarım üzerinde optimizasyon yapılabilirliği araştırılmış ve kanal sayılarının azaltılabileceği tespit edilmiştir. Optimizasyon sürecinin ardından simülasyonlar tekrarlanmış ve elde edilen sonuçlar doğrultusunda tasarım nihai hâline getirilmiştir.



Şekil 5. Maksimum çevresel gerilim bölgesi

	-40°C	140°C
X	90	55
Y	110	65
V3	35	39
V6	26	43

Tablo 2. Optimize edilmiş tasarım (Çevresel Gerilme - MPa)



Şekil 6: Maksimum eksenel gerilim bölgesi

	-40°C	140°C
X	186	22
Y	196	35
V3	119	-47
V6	134	-51

Tablo 3. Optimize edilmiş tasarım (Eksenel Gerilme - MPa)

Simülasyon ile tasarım doğrulama süreçlerinin tamamlanmasının ardından, üretilebilirlik açısından da değerlendirme yapılarak örnek bir numune üretilmiştir.



Şekil 7. Optimize edilmiş tüp tasarımının üretilmiş numunesi

3. SONUÇLAR

Termal genleşme ve büzülme, tasarım parametrelerine bağlı olarak farklı davranışlar sergilemektedir. Bu nedenle, genleşme ve büzülme kaynaklı çevresel (circumferential) ve eksenel (axial) çatlak oluşumları, iki ayrı durum göz önünde bulundurularak gerilim analizi kapsamında incelenmiştir. Yapılan simülasyonlar, yüksek gerilimin meydana geldiği kritik bölgelerin ve lokasyonların tüm varyasyonlarda büyük ölçüde aynı olduğunu göstermiştir.

Kanal sayısının artırılması, malzemenin dayanıklılığı açısından olumlu bir etki sağlamasına rağmen, üretim süreçlerinde ek işlem gereksinimleri ve maliyet artışına yol açmaktadır. Bu nedenle, tasarım optimize edilerek nihai hâline getirilmiştir.

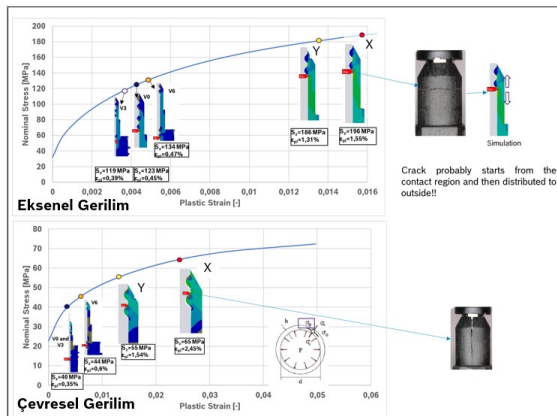
Numune üretimi aşamasında, üretim toleransları ve parça geometrisi dikkate alınarak tasarımın üretilebilirlik açısından uygunluğu sağlanmıştır. Bu sayede hem simülasyon ile tasarımın doğrulanması hem de üretim süreçleri uyumlu bir şekilde bütünleştirilmiştir.

Bu çalışma ile, dayanımı artırılmış yeni nesil enjektör tasarımı geliştirilerek CAE destekli yeni modelleme altyapısı kurulmuştur. Oluşturulan yeni tasarım global pazarda rekabet gücünü artırılmıştır. Elde edilen know-how, benzer projelerde kullanılabilecek modüler çözümler sunmakta ve şirketin yüksek teknolojiye dayalı ürün geliştirme vizyonuna katkı sağlamaktadır.

Sonuç olarak, optimize edilmiş tasarım hem daha kompakt hem de daha dayanıklı bir yapı sunmaktadır. Bu tasarım yaklaşımı, ürünün kalite, mekanik dayanıklılık ve pazar koşullarına uygunluk kriterlerini karşılamaktadır.

4. REFERANSLAR

- [1] S. Uğur, S. Oğuz, “Termal Genleşme ve Büzülmenin Plastik Malzemeler Üzerindeki Etkileri”, Journal of Polymer Engineering, cilt 12, No.3, 2020, s.145-158.
- [2] M. Kaya, A. Demir, “Pre-Aging Test ve Termal Şok Testlerinin Elektronik Bileşenler Üzerindeki Dayanıklılık Analizi”, Materials Testing Journal, cilt 25, No.1, 2019, s.32-44.
- [3] L. Yılmaz, H. Arslan, “Simülasyon Tabanlı Tasarım Optimizasyonu: Kanal Tasarımı ve Gerilim Analizi”, International Journal of Mechanical Design, cilt 8, No.2, 2021, s.67-82.
- [4] P. Singh, R. Kumar, “Circumferential and Axial Stress Analysis in Cylindrical Plastic Components Under Thermal Cycling”, Journal of Thermal Stresses, cilt 29, No.4, 2018, s.211-225.
- [5] B. Çelik, E. Yıldız, “Simülasyon ve Üretilebilirlik Uyumunun Optimizasyon Süreçlerine Etkisi”, Advanced Manufacturing Research, cilt 15, No.1, 2022, s.55-69.
- [6] J. Smith, K. Lee, “Design Validation of Plastic Injector Components Using Thermal Shock and Pre-Aging Tests”, International Journal of Polymer Science, cilt 10, No.3, 2020, s.101-115.



Şekil 8. Farklı tasarım önerilerinde meydana gelen çevresel (circumferential) ve eksenel (axial) gerilimlerin karşılaştırılması (x-ekseni: plastic strain, y-ekseni: Nominal stress (MPa))

YÜKSEK BASINÇLI YAKIT RAYINDA VİBRASYON TESTİ SONUCU OLUŞAN KIRIK İÇİN TASARIM İYİLEŞTİRME AKSİYONLARI
Mustafa Kerem Özder¹

¹ 1Bosch Sanayi ve Ticaret A.Ş., Yeşil Cadde, No:15 TÜRKİYE
Tel: 224 219 25 00 E-Posta: mustafakerem.ozder@tr.bosch.com

Özet - Son yıllarda otomotiv sektöründe artan rekabet ve müşteri beklentileri, ürün geliştirme ve doğrulama süreçlerinde karşılaşılan problemlerin hızlı ve etkin çözümlerle giderilmesini kritik bir gereklilik haline getirmiştir. Bu doğrultuda, mühendislik problemlerinin çözümünde bilgisayar destekli tasarım (CAD) ve sonlu elemanlar analizleri (FEA) gibi simülasyon tabanlı yöntemlerden geniş ölçüde yararlanılmaktadır. İçten yanmalı benzinli motorlarda kullanılan yakıt enjeksiyon sistemleri hem egzoz emisyonlarının azaltılması hem de motor verimliliğinin artırılması açısından kritik öneme sahip bileşenlerdir. Yüksek basınçlı yakıt rayında meydana gelebilecek bir kırık, yakıt sızıntısına ve dolayısıyla ciddi güvenlik risklerine yol açabileceğinden, tasarım sürecinde bu tür kırılmaların önlenmesi büyük önem taşımaktadır.

Bu çalışmada, vibrasyon testi sırasında kırık oluşan bir yakıt rayı ele alınmış; kırık bölgenin bertaraf edilmesi amacıyla üç boyutlu CAD modeller üzerinde çeşitli tasarım revizyonları geliştirilmiştir. Oluşturulan her bir tasarım opsiyonu için, sonlu elemanlar yöntemiyle modal analizler ve statik stres analizleri gerçekleştirilmiş; tasarım değişikliklerinin titreşim davranışına ve gerilme dağılımına etkisi detaylı olarak incelenmiştir.

Analiz sonuçları, tasarımın üretilebilirliği ve maliyet faktörleriyle birlikte değerlendirilmiş ve nihai olarak optimum tasarım önerisi belirlenmiştir. Bu yaklaşım sayesinde, vibrasyon testi esnasında yüksek basınçlı yakıt rayında meydana gelen kırığın önlenmesi amacıyla sanal analiz destekli bir tasarım iyileştirme süreci ortaya konmuştur.

Anahtar Kelimeler: Yakıt Rayı, Benzinli Motorlar, 3D Modelleme, Sonlu Elemanlarla Analiz

1. GİRİŞ

Dünya nüfusundaki artış ve bunun sonucunda hem insanların hem de yük taşımacılığındaki doğal artış, sera gazı emisyonlarından kaynaklanan iklim değişikliği sorunlarını küresel ölçüğe taşımıştır. Ulaşım sektörü, enerji üretim sektörünün ardından

ikinci en büyük sera gazı emisyonuna sahip sektör olarak sınıflandırılmaktadır.[1]

Günümüzde otomotiv endüstrisinde emisyon değerlerini düşürmek ana hedef haline gelmektedir. Bu sebeple içten yanmalı motorlarda kullanılan yakıt enjeksiyon sistemleri daha önemli hale gelmektedir. Yakıt püskürtme basınçları artırılarak daha az miktarda yakıt kullanılarak motordan yüksek verimler elde edilebilmektedir. Benzinli içten yanmalı motorlar için sistem basıncı 350-500 bar seviyelerine kadar çıkabilmektedir. Emisyon değerlerini düşürmenin bir diğer yöntemi ise taşıtlarda kullanılan komponentlerin daha hafif olacak biçimde tasarlanmasıdır.

Otomotiv sektöründe yeni ürün devreye alma süreçleri tasarım faaliyetleri ile başlayıp sanal ve fiziksel doğrulama süreçleri ile sona ermektedir. Bilgisayar teknolojilerinin ilerlemesi ile tasarım ve simülasyon yazılımları kullanılarak daha az deneme yanılma yapıp güvenilir ürün elde edilmektedir. İçten yanmalı motorların çalışma koşulları göz önüne alındığında ürün doğrulama çalışmaları için gerilme ve titreşim analizleri yapılmaktadır. Simülasyonlar tamamlandıktan ve fiziksel ürün üretildikten sonra yakıt rayı titreşim testine girip test edilmektedir.

2.TEORİ

Gerilim değeri uygulanan kuvvetin birim yüzey alanına oranı ile bulunmaktadır. Meydana gelen gerilim değerinin malzeme akma mukavemetini aşması durumunda parça üzerinde kalıcı şekil değişikliği meydana gelmektedir.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

F: Kuvvet, A: Birim yüzey alanı

Bir cisme bazı dış kuvvetler uygulandığında, cismin boyutlarında bir değişim olur. Cismin boyutundaki değişimin orijinal boyuta oranına şekil değiştirme (strain) denir.[2]

$$\varepsilon = \frac{L_1 - L_0}{L_0} \quad (2)$$

L_1 : Son boy, L_0 : İlk boy

Bir cismin sadece rijitliğine ve kütlesine bağlı olan bir frekans değerinde uyarılması durumunda cisim yüksek genlikle ve sürekli olarak titreşir. Bu frekans “Doğal Frekans” olarak isimlendirilir.

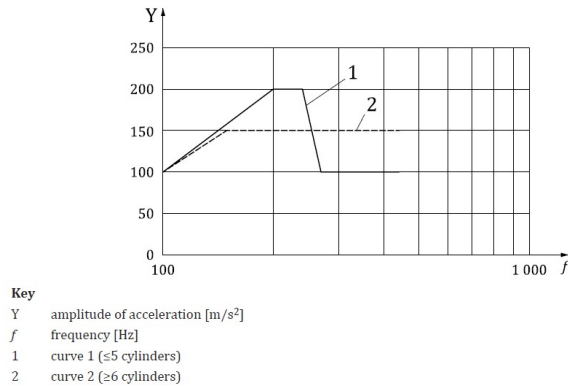
$$\text{Doğal Frekans} = f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \text{ Hz} \quad (3)$$

k: direngenlik, m: kütle

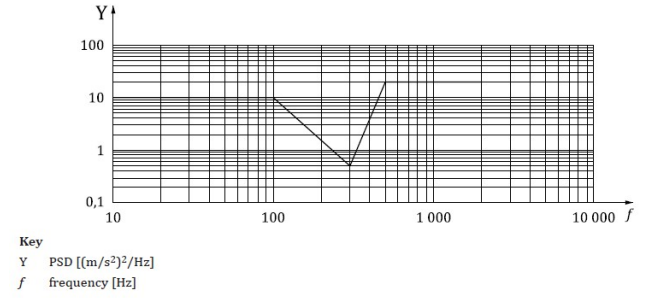
Bir makinenin veya yapının doğal titreşim frekansı, dış uyarılmanın frekansıyla çakıştığında, rezonans olarak bilinen bir olgu meydana gelir ve yüksek genlik ile titreşmeye başlar.[3]

SoR(Sine on Random) testi ürün doğrulama sürecinde standart olarak yapılan bir titreşim testidir. Düşük frekanslardaki sinüzoidal titreşim profili ile yüksek frekanslardaki rastgele titreşim profillerinin kombinasyonu olacak şekilde test yapılmaktadır. Test yaklaşık olarak her bir kuvvet yönü(X-Y-Z) için 40 saat sürmektedir. Test prosedürü detaylı olarak ISO 16750-3 normunda açıklanmaktadır. Motorda kullanılan silindir sayısına göre uygulanan titreşim profili değişiklik göstermektedir. Bu test, yakıt rayının yorulma dayanımını tespit etmek için yeterli titreşim yüküne sahip olacak şekilde tasarlanmıştır.

Şekil1. Sinüzoidal Titreşim Profili Grafiği [4]



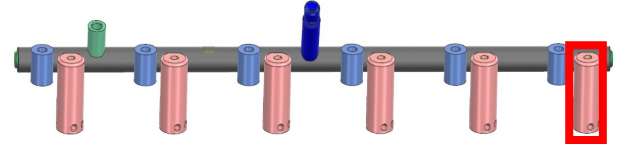
Şekil2. Rastgele Titreşim Profili Grafiği [1]



3.TASARIM ANALİZ

Yakıt rayının 6. enjektör braketleri (Şekil3'te kırmızı ile işaretlenmiştir) bölgesinde oluşan gerilim değerini ve titreşim genliğini düşürebilmek için 3 adet tasarım opsiyonu oluşturuldu. Bu tasarım opsiyonları oluşturulurken ürünün fonksiyonu, üretilebilirlik ve maliyet parametreleri göz önüne alındı.

Şekil3. Yakıt Rayı



Opsiyon 1 incelendiği zaman 6. Enjektör braketleri bölgesinde oluşan gerilmeyi azaltmak için ağırlık hafifletmeye çalışıldı.

Opsiyon 2 incelendiği zaman 6. Enjektör braketleri bölgesinde oluşan gerilmeyi azaltmak ve rijitliği arttırmak için sac metal braket eklenmiştir.

Opsiyon 3 ise Opsiyon 1 ve Opsiyon 2'nin kombinasyonu olarak tasarlanmıştır.

Şekil4. Tasarım Opsiyonları Özet Tablosu

	Baz Model	Opsiyon1	Opsiyon2	Opsiyon3
Ağırlık (kg)	0.144	0.116	0.140 + 0.114	0.116 + 0.114
Maliyet (1-10)	-	1	8	10
Üretilebilirlik (1-10)	-	2	6	7
Zaman (Hafta)	-	20	25	25

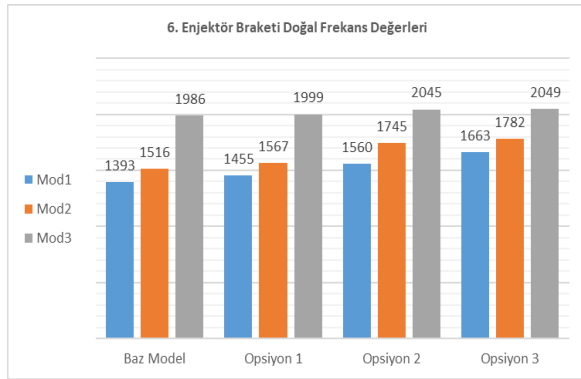
Sanal analizler için ANSYS mechanical yazılımı kullanıldı. Mesh yapısı oluşturulurken tetrahedron eleman tipi kullanılmıştır. Mesh yapısı, dar bölgelere yeterli hassasiyeti sağlayacak şekilde yerel olarak yoğunlaştırılmıştır. Her eksende ISO profilinden alınan PSD(Power Spectrum Denstiy) değerleri girdi olarak kullanılarak gerilme analizi yapılmıştır.

Şekil5. Mesh Yapısı Oluşturulmuş Model



Farklı tasarım opsiyonlarına göre altıncı enjektör braketini doğal frekans değişimi Şekil6'daki gibidir.

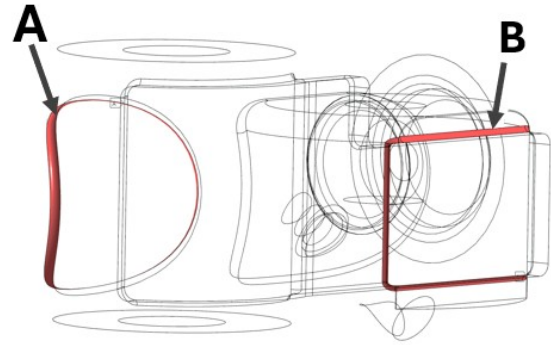
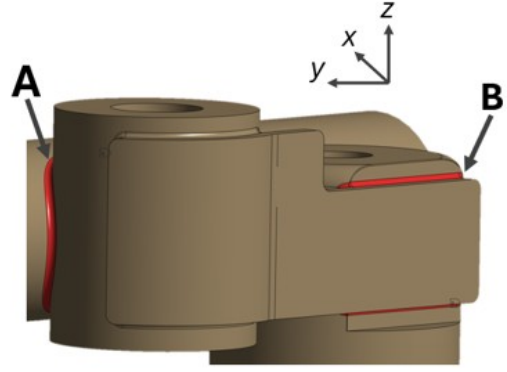
Şekil6. Altıncı Enjektör Braketi Doğal Frekans Değerleri



Baz modelden Opsiyon3'e doğru doğal frekans değerinin arttığı gözlemlenmektedir.

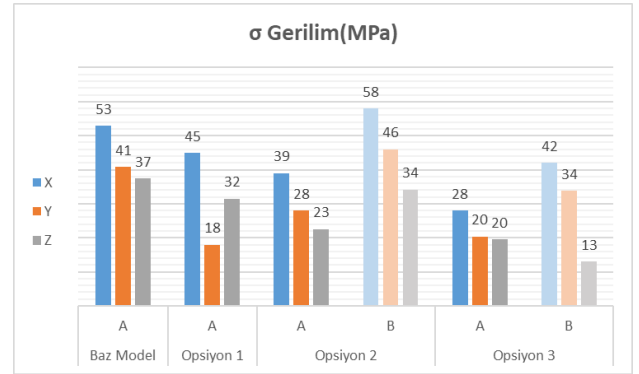
Yakıt rayı üzerinde kritik olan A ve B lehim bölgelerinin pozisyonları Şekil7'deki gibidir. A bölgesi altıncı bağlantı braketinin tüp ile lehimlendiği alanı ifade etmektedir. B bölgesi ise Opsiyon2 ve Opsiyon3 tasarımlarında bulunan sac metal parça ile enjektör braketinin lehimlendiği alanı ifade etmektedir.

Şekil7. Lehim Bölgeleri



ISO profiline göre gerilme(stres) analizi yapıldığı zaman yakıt rayı üzerinde A ve B bölgelerinde oluşan gerilim değerleri Şekil8'deki gibidir.

Şekil8. Altıncı Enjektör Braketi Doğal Frekans Değerleri

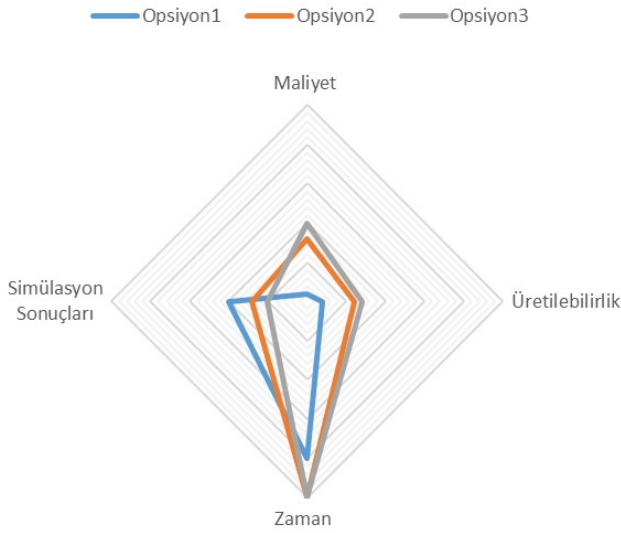


Baz modelden Opsiyon3'e doğru sigma gerilim değerlerinin azaldığı gözlemlenmektedir.

4. SONUÇ

Oluşturulan tasarım opsiyonlarının hepsi gerilim değerlerini düşürmekte ve doğal frekans değerlerini arttırmaktadır. Bu durum problemlili olan altıncı enjektör braketli bölgesindeki problemi iyileştirmektedir. Nihai çözümün bulunması ve simülasyonların yanı sıra fiziksel doğrulamanın yapılabilmesi için tasarım opsiyonları arasında seçim yapılması gerekmektedir. Optimum çözümün bulunabilmesi için tasarım opsiyonları maliyet üretilebilirlik ve zaman açısından değerlendirildiğinde Opsiyon1 öne çıkmıştır. Şekil9'daki grafik incelendiği zaman daha az alana sahip olan Opsiyon1 seçilerek optimum çözüm olarak belirlenmiştir.

Şekil9. Tasarım Opsiyonları Değerlendirme Grafiği



Sonraki adım olarak Opsiyon1 tasarımı prototip olarak üretilecektir ve prototip yakıt rayı testlere sokulup fiziksel doğrulaması yapılacaktır.

5. REFERANSLAR

- [1] Lochman L. and Pekin E.-Transport and greenhouse gas emissions: challenges for 2030. 05 10 2017
- [2] R.K. Bansal “Strength of Materials”, 3rd Edition s.2
- [3] S.Rao, “Mechanical Vibrations”, 5th Edition, s.11
- [4] ISO 16750-3:2023

ROBOT KOLLU EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİ İLE BÜYÜK EBATLI PARÇA ÜRETİMİ

Doç. Dr. İsmail DURGUN¹, Davut BAŞARAN²

¹ID ARGE Eğitim & Danışmanlık, Bursa / TÜRKİYE

Tel: 532 373 53 11 E-Posta ismaildurgun67@gmail.com

²Başaran Yenilikçi Teknolojiler San. ve Tic. Ltd. Şti, İstanbul / TÜRKİYE

Tel: 533 601 33 95 davut@basaran.tech

Özet- Otomotiv sektörü, teknolojik yeniliklerin hızla ilerlediği ve rekabetçi pazar şartlarının etkisiyle dünyanın en dinamik endüstrilerinden biri haline gelmiştir. Elektrikli ve otonom araçların gelişimi, sürdürülebilirlik odaklı yaklaşımlar ve dijital dönüşüm projeleri gibi çeşitli alanlarda öncü olan sektör, nitelikli AR-GE mühendislerine olan ihtiyacı her geçen gün artırmaktadır. Bu mühendislerin teknik uzmanlıklarının yanı sıra yenilikçilik, problem çözme, ekip çalışması ve sürdürülebilirlik gibi kişisel ve mesleki yetkinliklerini de geliştirmeleri gerekmektedir.

Bu çalışma, otomotiv AR-GE mühendisinin iş ortamında çıkan karmaşık sorunlarla başa çıkabilmesini ve yenilikçi çözümler üretebilmesini sağlayacak bir yetkinlik gelişim programı sunmaktadır. Program, otomotiv sektöründe faaliyet gösteren firmaların ihtiyaç duyduğu yetkinliklerin tespiti ile başlamış, insan kaynakları ve Ar-Ge yöneticilerinin önerileri ile şekillendirilmiştir. Farklı illerde gerçekleştirilen program bölgesel ihtiyaçlara da hizmet verecek şekilde tasarlanmıştır. Program otomotiv sektöründe yeni göreve başlayacak mühendisler ile gerçekleştirilmiştir. Program sonunda elde edilen veriler ışığında yeni iş başı yapacak mühendisler için kazanılması gereken yetkinlikler ve bunun için alınması gerekli eğitimler önerilmektedir.

ANAHTAR SÖZCÜKLER: 3B yazıcı, eklemeli imalat, robotik, LFAM, Caracol

1. GİRİŞ

Eklemeli Üretim Teknolojisi, bilgisayar ortamında oluşturulmuş üç boyutlu CAD çizimlerin kalıp kullanılmadan, katmanlı üretim metoduyla fiziksel model elde etme yöntemidir. Eklemeli Üretim Teknolojisi birçok tasarım ya da fikrin kısa sürede gerçeğe dönüşmesini

sağlamaktadır. Karmaşık ve hatta birbirleriyle montajlı bir şekilde çalışan parçalar bu yöntemlerle tek seferde üretilmekte, kontrol için birçok kolaylığı beraberinde sunmaktadır. Eklemeli Üretim Teknolojileri, tasarımcılara model geliştirmelerinde özgürlük sağladığı gibi, ürün geliştirme projelerinin zaman planlarının kısaltılmasına, test maliyetlerinin düşürülmesine ve ürünlerin daha proje aşamasındayken sertifikasyon işlemlerinin tamamlanmasına yardımcı olmaktadır (1,2).

Üretim ve ürün geliştirme süreçlerinde her geçen gün 3B yazıcıların kullanımı artmaktadır. Artan bu kullanım önünde önemli engellerden birisi üretilen parça boyutlarının yeteri kadar büyük olmamasıdır. Robot teknolojisindeki gelişmeler bu soruna çözüm getirmiştir. Büyük Ölçekli Katmanlı Üretim (LFAM - Large Format Additive Manufacturing) bir katmanlı üretim teknolojileri ailesidir. Bu yöntemde yüksek baskı hızı sayesinde metrelerle ölçülen büyük parçaların kısa sürelerde imal edilebilmektedir. Termoplastik malzemeler ile birlikte karbon ve cam elyaf takviyeli malzemelerde başarı ile kullanılabilir. Bu teknoloji birçok farklı sektörde kullanılmaktadır (3,4);

- Havacılık ve Uzay
- Mimarlık ve İnşaat
- Sanat ve Eğlence
- Otomotiv ve Motor Sporları
- Tasarım ve Mobilya
- Enerji
- Endüstriyel Makineler
- Denizcilik
- Demiryolları
- Aparat ve Fikstür



Şekil 1: LFAM üretim sistemi

2. CARACOL LFAM SİSTEMİ

Caracol sistemi robot kol entegrasyonlu büyük ebatlı bir 3B yazıcı sistemidir. LFAM sistemleri robot kol ile birlikte geleneksel 3B yazıcılar ile ayrışır. Geleneksel 3B yazıcılar genellikle X-Y-Z lineer eksenler üzerinde çalışırken Caracol sistemi ile 6 hatta 7 eksenle baskı yapılabilir. Çok eksenli baskılar sayesinde geometrik kısıtlamalar azalır, eğimli yüzeylere veya serbest formlu tasarımlara da doğrudan malzeme basılabilir. Direk baskı yapan çözümleri yanında hibrit çözümleri ile doğrudan nihai parça üretebilen bu yöntemin avantaj ve dezavantajlarını söyleyebiliriz;

Avantajları

- Hız – 40 Kg Basma Kapasitesi
- Maliyet Tasarrufu
- Granül Malzeme Kullanabilme
- Tasarım Özgürlüğü
- Kişiselleştirme ve Esneklik
- Hafiflik
- Azaltılmış Atık
- Sürdürülebilirlik
- Karmaşık Geometriler
- Kalıp Gerektirmez
- Endüstriyel Termoplastikler
- 6 Eksen Baskı
- Destek Malzeme Çok Az ya da Hiç Yok
- Malzeme Çeşitliliği
- Esneklik

Dezavantajları

- Yüzey Kalitesi
- Mekanik Özellikler (Anizotropi)
- Malzeme Sınırlamaları
- Yüksek Ekipman Yatırımı
- Uzmanlık Gereksinimi
- Enjeksiyona Göre Düşük Üretim Hızı
- Robot Boyutları ile Sınırlı
- Enjeksiyona Göre Pahalı
- Destek Malzemenin Temizlenmesi
- Son İşlem Gerekliliği

Bu yöntemin avantajlarından birisi de hem filament şeklinde hem de granül şeklinde çok sayıda malzeme kullanabilmektedir. Bu malzemelerden bazıları (5);

- Termoplastikler: ABS, PLA
- Karbon Fiber Takviyeli PLA (CF-PLA)
- Karbon Fiber Takviyeli Poliamid (CF-PA / Nylon)
- Karbon Fiber Takviyeli Polietilen (HDPE)
- Cam Fiber Takviyeli Poliamid (GF-PA / Nylon), PET, PP (Polipropilen)
- Karbon Fiber Takviyeli PET (CF-PET)
- Yüksek Performanslı Polimerler: TPE, PEEK (Polyether Ether Ketone) ve PEI (Polyetherimide-ULTEM)

Bugün otomotiv sektöründe yaygın kullanımı olan FDM metodu ile Caracol LFAM sistemini karşılaştırarak (Tablo 1) hangi durumda hangi metodu kullanmamız gerektiğine karar verebiliriz

Tablo 1: Caracol LFAM ve Klasik FDM metotlarının karşılaştırması

Özellik / Kriter	Caracol LFAM (Robot Kollu)	FDM (Filament Bazlı)
Ölçek	Çok büyük boyutlu parçalar (3m+ tek parça üretim)	Genelde küçük-orta boyutlu parçalar (20-50 cm)
Hareket Sistemi	6 eksenli robot kol Serbest, eğimli ve organik yollar	3 lineer eksen (X-Y-Z) Dikey katmanlama zorunlu
Malzeme Besleme	Granül bazlı yüksek debili ekstrüder (ucuz hammadde)	Filament bazlı (daha pahalı hammadde)
Üretim Hızı	Yüksek → kg/saat seviyesinde üretim (40 Kg saat)	Düşük → gr/saat seviyesinde üretim (max 50 gr/saat)
Destek Yapısı İhtiyacı	Çoğu zaman gerekmez (çok eksenli yazım sayesinde)	Çoğu zaman gerekli (dikey katman sebebiyle)
Malzeme Çeşitliliği	PA, PP, ABS, PC, CF/GF kompozit granüller	PLA, ABS, PETG, PA, kompozit filamentler
Maliyet Avantajı	Düşük (granül kullanımı ve hız avantajı)	Yüksek (filament maliyeti ve yavaş üretim)
Yüzey Kalitesi	Orta – genellikle son işlem (freze, zımpara, kaplama) gerekir	Daha iyi yüzey kalitesi (küçük nozul, ince katman)
Kullanım Alanı	Kalıp üretimi, jig, aparat, büyük prototip, son kullanım parçaları (endüstriyel odak)	Küçük prototip, düşük adetli parça, eğitim, hobi veya masalüstü kullanım
Esneklik	Büyük geometriler + çok eksenli hareket → tasarım özgürlüğü	Küçük parçalar için daha uygun ama sınırlı hacim
Yatırım & Sistem Karmaşıklığı	Yüksek yatırım maliyeti, endüstriyel altyapı gerekir	Daha düşük yatırım, kolay kullanım, masalüstü cihazlar da var

3. OTOMOTİV KULLANIM ALANLARI

Büyük ölçekli 3B yazıcılar otomotiv endüstrisi tasarım ve üretim süreçlerinde hızlı, esnek ve maliyet avantajları nedeni ile stil, prototipleme, tasarım doğrulama, kişiselleştirme ve kalıp çalışmalarında hızla kullanımı artmaktadır (6,7,8). Otomotivdeki kullanım alanlarını kısaca özetlemek gerekirse (Şekil 1);

- Stil Araçlar: Stil geliştirme çalışmalarında ihtiyaç duyulan büyük parçaların ve modellerin üretilmesinde
- Model Araçlar: Ürün geliştirme sürecinde ihtiyaç duyulan modellerin (rüzgâr tüneli, ergonomi çalışma modelleri gibi) üretilmesinde
- Prototipleme: Prototip araçlarda kullanılmak üzere torpido, konsol, hava kanalları, kapı panelleri, tamponlar, bagaj kaplamaları ve spoiler gibi büyük parçaların üretilmesinde
- Tasarım Doğrulama: Ürün geliştirme sürecinde yapılan tasarımları boyutsal ve montajlına bilirlilik doğrulaması süreçlerinde kullanılacak parçaların üretilmesinde
- Kişiselleştirilmiş Ürünler: Gün geçtikçe müşteri ihtiyaçlarını karşılamak için ürünlerde

kişiselleştirme çalışmaları artmaktadır. Kişiselleştirilmiş ürünlerin üretilmesinde

- Konsept Araç Parçaları: Az sayıda üretilen ve konsept araçlarda geleneksel yöntemler ile üretilmesi zor ve oldukça maliyetli parçaların üretilmesinde
- Montaj Aparat ve Fikstürleri: Otomotiv montaj hatlarında parçaların (cam montajı, kapı hizalama gibi) doğru pozisyonlanması için hafif ve ergonomik aparat ve masterların üretilmesinde
- Hafifletilmiş Parçalar: Hem içten yanmalı hem de elektrikli araçlarda önemli olan araç hafifletme çalışmaları için hafifletilmiş (bal peteği veya kafes yapılar) büyük parçaların üretilmesinde
- Karavan ve Tırlar: Kişiselleştirilmiş büyük iç mekân parçalarının hızlı üretilmesinde
- Kompozit Kalıpları: Gövde parçaları gibi büyük kompozit parçalarının kalıplarının ucuz ve hızlı şekilde üretilmesinde
- Robot Tutucuları: Otomasyon robotlarının, araç gövdesini veya parçaları tutmak için kullandığı özel tasarım tutucu başlıkların üretilmesinde



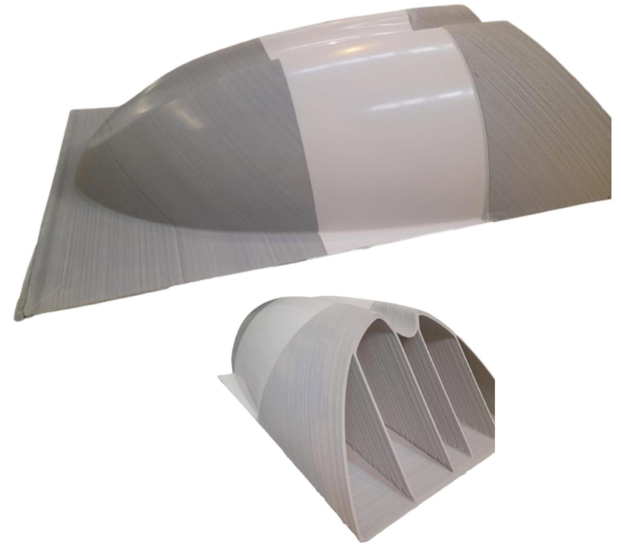
Şekil 1: LFAM metotları ile üretilmiş otomotiv parçaları (5)

4. CARACOL LFAM UYGULAMASI

Bu çalışmada tekne burnunun kompozit olarak üretilmesi için model imalatı gerçekleştirilmiştir. Mevcut üretim yöntemlerinde poliüretan veya MDF (medium density fiberboard) bloklar ya da strafor üzeri epoksi uygulaması ile elde edilen bu model üzerine fiber serimi ve reçine emdirilmesi ile kompozit kalıp üretilmektedir. Caracol sistemi ile bu model çok daha kısa sürede ve hassasiyette üretilmiştir. Bu model kullanılarak elde edilen kalıp metal konstrüksiyon ile güçlendirilmekte ve kompozit parça üretiminde kullanılmaktadır. Bu çalışmada kalıp üretimi için sadece model üretimi gerçekleştirilmiştir. İstenildiğinde direk olarak kompozit kalıbı da bu yöntem ile üretmek mümkündür. Bu durum üretim süreçlerinde bir basamağı daha ortadan kaldırdığı için çok ciddi süre ve maliyet avantajı sağlamaktadır.

Üretilen modelin boyutları 860 x 1560 x 400 mm'dir. Üretim için 5 mm nozul ve 2,5 mm katman kalınlığı kullanılmıştır. 28 saat süren üretim süresi sonunda 47 kg ağırlığındaki model üretimi gerçekleştirilmiştir. Model yüzeyinin kompozit kalıp üretimine hazırlanması için de CNC işleme ve ardıl işlemlere 3,5 saat zaman harcanmıştır. Modelin iç yapısı boş bırakılarak sadece güçlendirme amacıyla federler eklenmiş, geometrinin en doğru şekilde elde edilmesi için de 45 derecelik oryantasyonla üretim gerçekleştirilmiştir.

Gerçekleştirilen bu üretim ile kompozit parça üretim süreçleri kısaltılmış, maliyet tasarrufu sağlanmış ve daha kaliteli bir kalıp modeli elde edilmiştir.



Şekil 2: Üretilen tekne burun modeli

5. SONUÇLAR

LFAM imalat dünyasında bir oyun değiştirici olarak yer almaktadır. Büyük boyutlu ve karmaşık geometrili parçaların hızlı üretimlerini gerçekleştirerek tasarım süreçlerine büyük katkı sağlamaktadır. Termoplastik malzemelerin kullanımına imkân tanıyan bu sistemler

tasarıma uygun malzemeler ile parça basımı yapabilmektedir. Yüzey kalitesinde iyileştirme sağlamak için geliştirilen CNC işleme kabiliyetine sahip hibrit sistemler ile ya da baskı sonrasında CNC işleme ve ardıl işlemler ile basılan parçalar direk olarak ürün üzerinde kullanılabilir.

Hali hazırda çok sayıda sistem birçok farklı sektörde kullanılıyor olsa da bazı zorluklar hala çözüm ve deneyim gerektirmektedir;

- Robotik kol hareketlerinin ve ekstrüderin malzeme çıktısının eş zamanlı çalışmasını sağlamak;
- Parçalar geleneksel FDM'den çok daha büyük olduğundan malzeme bütülmesini kontrol etmek;
- Katman yüksekliği geleneksel FDM sistemlerine göre çok daha yüksek olduğundan iyi bir yüzey kalitesine sahip olmak;
- Yüzey kalitesini iyileştirmek için uygun yapı platformlarının seçilmesi;
- Uygun katkı maddeleri/dolgu uygun malzemelerin seçilmesi;
- Özellikle 1. katman ile yapı platformu arasında iyi yapışma;
- Şeffaf malzemeler için nem emiliminin azaltılması;
- Eklemeli imalat için tasarım çalışmaları büyük formatlı parçalarda kusurların daha belirgin olması ve bazı tasarım sorunlarının küçük parçalara kıyasla daha da artması nedeniyle önemli bir rol oynar.
- Tasarımın yanı sıra, yollar, açılar, hızlar, sıcaklık ve diğerlerinin de iyi bir son yüzey oluşturmak için ayarlanması gerekir.

Özet olarak bu yöntemin kullanımı birçok sektörde olduğu gibi otomotiv sektöründe de tasarım sürecinin kısılmasına ve üretim sürecine sağladığı katkılar ile hızla artacaktır.

6. REFERANSLAR

- [1] D. İsmail, D. Başaran, “FDM Katmanlı Üretim Teknolojisinin Araç Geliştirme Sürecindeki Uygulamaları”, OTEKON 2010, 5. Otomotiv Teknolojileri Kongresi, 07 – 08 Haziran 2010, Bursa, s.89-96
- [2] D. İsmail, “Otomotivde Dijital İmalat”, 12. Otomotiv ve Üretim Teknolojileri Sempozyumu, 13 – 14 Mayıs 2011, Bursa, s.327-337
- [3] J. H. C. Brito, “Design for Large Scale Additive Manufacturing”, Porto Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Master Tezi, Porto, 2023
- [4] D. Aywan, Development of a Large Format Additive Manufacturing System Based on an Off-The-Self Pellet Extruder”, Güney Carolina Üniversitesi Master Tezi, 2024
- [5] Caracol AM, “Otomotiv Endüstrisinde Katmanlı Üretim”, <https://caracol-am.com/industries/automotive>, 25 Eylül 2025
- [6] M. S. V. Carlos, S. Manuel, R. Luís, R. António, L. Marco, “Large Format Additive Manufacturing of Polymer Extrusion Based Deposition Systems: Review and Applications”, Journal of Progress in Additive Manufacturing (2023) 8:1257–1280, <https://doi.org/10.1007/s40964-023-00397-9>
- [7] D. G. Guo, K. W. Kin, T. Nigel, L. S. Hang, L. S. N. Mui, “Large Format Additive Manufacturing of Polymers: a Review of Fabrication Processes, Materials and Design”, Journal of Virtual and Physical Prototyping, 2024, Vol. 19, No. 1, <https://doi.org/10.1080/17452759.2024.2336160>
- [8] E. Akhil, “Marketing and Potential Application Review of Large-Scale Additive Manufacturing”, Viyana Teknoloji Üniversitesi Master Tezi, No: 12302443, Jan. 2025

ELEKTRİKLİ ARAÇ BATARYA TAŞIYICI SİSTEMLERİNDE ALÜMİNYUM EKSTRÜZYON TEKNOLOJİSİNİN TASARIM, ÜRETİM VE PERFORMANS AÇISINDAN İNCELENMESİ

Barış Kömürcü¹, Özgür Can Çağlier², Enes Kurtuluş³

¹Coşkunöz Metal Form A.Ş. Fethiye OSB, Mavi Cd. No:5, 16159 Organize Sanayi Bölgesi Nilüfer/Bursa
Tel: 553 955 45 00 E-Posta: bkomurcu@coskunuz.com.tr

²Coşkunöz Metal Form A.Ş. Fethiye OSB, Mavi Cd. No:5, 16159 Organize Sanayi Bölgesi Nilüfer/Bursa
Tel: 539 933 60 97 E-Posta: ocaglier@coskunuz.com.tr

³Coşkunöz Metal Form A.Ş. Fethiye OSB, Mavi Cd. No:5, 16159 Organize Sanayi Bölgesi Nilüfer/Bursa
Tel: 531 342 18 66 E-Posta: ekurtulus@coskunuz.com.tr

ÖZET

Elektrikli araçların yaygınlaşması, batarya taşıyıcı sistemlerin yapısal bütünlük, güvenlik ve termal yönetim açısından stratejik bir öneme sahip olmasını beraberinde getirmiştir. Bu çalışmada, alüminyum ekstrüzyon teknolojisinin elektrikli araç batarya taşıyıcı sistemlerindeki rolü incelenmiştir. Özellikle 6xxx serisi alaşımlar, düşük yoğunluk, yüksek özgül mukavemet, iyi kaynaklanabilirlik, termal iletkenlik ve geri dönüştürülebilirlik özellikleriyle öne çıkmaktadır. Çalışmada malzeme seçimi, ısıtma işlemi, ekstrüzyon parametreleri, tasarım kriterleri ve alt komponentlerin üretim yöntemleri değerlendirilmiştir. Bulgular, ekstrüzyon sürecinde kalıp tasarımı ve et kalınlığı homojenliğinin geometrik stabilite üzerinde belirleyici olduğunu; Friction Stir Welding (FSW) yönteminin yüksek sızdırmazlık ve düşük deformasyon sağladığını; alüminyumun yüksek termal iletkenliği sayesinde etkin soğutma sağladığını göstermektedir. Ayrıca NVH performansı açısından odacıklı profil tasarımlarının titreşim kontrolünde avantaj sunduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte, alüminyumun düşük ergime sıcaklığı ve çeliğe kıyasla daha düşük darbe dayanımı, yangın güvenliği ve çarpışma dayanımı açısından sınırlayıcı faktörlerdir. Çalışmada, hibrit malzeme kullanımı, ileri kaynak teknolojileri ve proses optimizasyonu gibi stratejilerin bu sınırlamaları aşmak için gerekli olduğu vurgulanmaktadır. Sonuç olarak, alüminyum ekstrüzyon teknolojisi, elektrikli araç batarya taşıyıcı sistemlerinde hafiflik, üretim verimliliği, termal performans ve sürdürülebilirlik açısından güçlü bir çözüm sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Elektrikli araç, batarya taşıyıcı sistem, ESS, alüminyum ekstrüzyon, 6xxx serisi alaşımlar, Friction Stir Welding (FSW), termal yönetim.

1. GİRİŞ

Elektrikli araç (EA) teknolojilerinin hızla gelişmesi, enerji depolama sistemlerinin güvenliği, verimliliği ve sürdürülebilirliği konularında yeni mühendislik çözümlerini zorunlu kılmaktadır (1). Bu bağlamda, batarya taşıyıcı sistemler hem yapısal hem de termal ve elektriksel güvenlik açısından kritik bir rol üstlenmektedir (2). Batarya taşıyıcılar, yüksek voltajlı pil modüllerini koruyan, araç mimarisiyle uyumlu, çarpışma güvenliği sağlayan ve termal yönetim sistemlerini destekleyen çok işlevli alt sistemlerdir (2).

Bu sistemlerin tasarımında kullanılan malzeme seçimi, hem performans hem de çevresel etkiler açısından büyük önem taşımaktadır. Alüminyum, düşük yoğunluğu, yüksek özgül enerji emme kapasitesi, iyi termal iletkenliği ve geri dönüştürülebilirliği sayesinde çelik ve kompozit malzemelere karşı güçlü bir alternatif olarak öne çıkmaktadır (3). Özellikle alüminyum ekstrüzyon teknolojisi, karmaşık geometrilere sahip, kaynak dikişsiz, hafif ve dayanıklı profillerin üretimini mümkün kılarak batarya taşıyıcı sistemlerin gereksinimlerini karşılamada önemli avantajlar sunmaktadır (4).

Alüminyum ekstrüzyon prosesinin sunduğu düşük kalıp yatırım maliyeti, kısa teslim süresi, montaj kolaylığı ve işleme operasyonlarını azaltma kabiliyeti, elektrikli araç endüstrisinde bu yöntemin tercih edilme nedenleri arasında yer almaktadır (4). Bununla birlikte, ekstrüzyon prosesinin doğal sınırları, kalıp tasarımı, et kalınlığı optimizasyonu ve yüzey kalitesi gibi faktörler ürün performansını doğrudan etkilemektedir (5).

Şekil:1 Çeşitli Üretim Prosesleri ve İmalat Kalıplarına Göre Yaklaşık Yatırım Maliyetleri [36]

İşlem	Parça Takım Maliyeti (\$)
Vinil Ekstrüzyon	1.500 ve üzeri
Enjeksiyon Kalıplama	25.000 ve üzeri
Döküm	25.000 ve üzeri
Rulo Şekillendirme (Rollforming)	30.000 ve üzeri
Kalıpta Soğuk Şekillendirme (Stamping)	5.000 ve üzeri
Ekstrüzyon	500 ila 5.000

Bu çalışmada, elektrikli araç batarya taşıyıcı sistemlerinde alüminyum ekstrüzyon teknolojisinin rolü kapsamlı bir şekilde incelenmekte; malzeme seçimi, üretim prosesleri, tasarım kriterleri ve kalite kontrol yöntemleri ele alınarak Türkiye özelinde potansiyeller ve karşılaşılan zorluklar değerlendirilmektedir.

2. MATERİYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada, elektrikli araç batarya taşıyıcı sistemlerinin tasarım ve üretim süreçlerinde alüminyum ekstrüzyon teknolojisinin uygulanabilirliği, avantajları ve sınırları detaylı olarak incelenmiştir. Kullanılan malzemeler, üretim prosesleri, tasarım kriterleri ve analiz yöntemleri aşağıda sistematik biçimde sunulmuştur.

2.1 Malzeme Seçimi ve Alaşım Özellikleri
Elektrikli araç batarya taşıyıcı sistemlerinde kullanılan malzeme seçiminde, düşük yoğunluk, yüksek özgül mukavemet, iyi termal iletkenlik ve geri dönüştürülebilirlik gibi kriterler ön planda tutulmuştur (6). Bu bağlamda, alüminyum alaşımları özellikle 6xxx serisi (6061, 6063, 6082) tercih edilmiştir (7). Bu alaşımlar, magnezyum ve silikon içerikleri sayesinde hem şekillendirilebilirlik hem de kaynaklanabilirlik açısından optimum performans sunmaktadır.

Alaşımların sınıflandırılması, kimyasal bileşimlerine göre yapılmış olup, her seri farklı bir ana alaşım elementi içermektedir. Örneğin: 1xxx serisi: %99 ve üzeri saflıkta alüminyum, yüksek iletkenlik ve korozyon direnci.
2xxx serisi: Bakır esaslı, yüksek mukavemetli ancak düşük atmosferik korozyon direnci.
6xxx serisi: Mg-Si esaslı, dengeli mekanik özellikler ve mükemmel kaynaklanabilirlik (8).

Bu alaşımların mekanik özellikleri, çekme dayanımı, akma dayanımı, uzama oranı ve sertlik gibi parametrelerle karakterize edilmiştir. Ayrıca, alaşımların termal iletkenlik ve korozyon direnci

gibi fiziksel özellikleri de batarya taşıyıcı sistemlerin performansını doğrudan etkilemektedir.

2.2 Isıl İşlem Prosesleri ve Temper Kondisyonları
Alüminyum alaşımlarına uygulanan ısııl işlem prosesleri, malzemenin mekanik ve fiziksel özelliklerini iyileştirmek amacıyla gerçekleştirilmiştir (9). Bu çalışmada aşağıdaki ısııl işlem adımları uygulanır:

Çözelti Isıl İşlem (Solution Heat Treatment):

Alaşım, 500–550°C sıcaklıkta homojenleştirilir.

Quenching (Hızlı Soğutma): Su veya hava ile hızlı soğutma uygulanarak çözelti fazı korunur.

Yapay Yaşlandırma (Artificial Aging): 120–200°C sıcaklıkta belirli süre bekletilerek malzemenin mukavemeti artırılır.

Temper Kodları: Ürünlerin temper durumları ANSI H35.1, EN 515 ve ISO 2107 standartlarına göre tanımlanır (örn. T6, O, H) (10).

Bu işlemler, özellikle kaynak sonrası oluşabilecek iç gerilmeleri azaltmak ve yüzey kalitesini iyileştirmek amacıyla kritik öneme sahiptir.

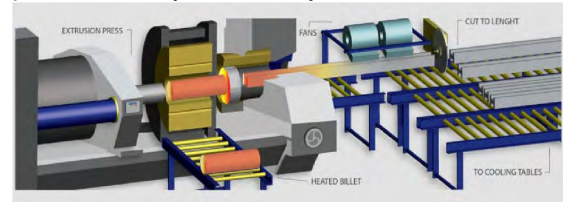
2.3 Ekstrüzyon Proses Parametreleri

Alüminyum ekstrüzyon prosesi, ön ısıtılmış biyetlerin yüksek basınç altında kalıptan geçirilerek istenen profilin elde edilmesini sağlar. Bu çalışmada kullanılan ekstrüzyon presleri ve kalıplar aşağıdaki şekilde sınıflandırılmıştır:

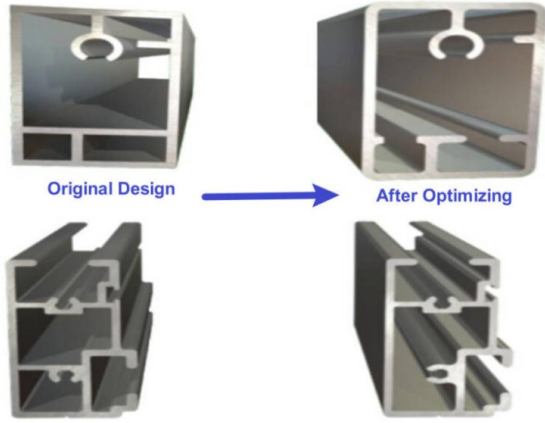
Solid Kalıplar: Açık kesitli profiller için ekonomik ve basit çözümler sunar.

Zıvanalı (Porthole) Kalıplar: İç boşluklu ve karmaşık kesitli profiller için kullanılır; biyet kalıp içinde bölünür ve kaynak odasında yeniden birleşir (5).

Şekil:2 Alüminyum Ekstrüzyon Pres Kesiti



Ekstrüzyon akışı biyet merkezinde daha hızlı gerçekleştiğinden, dış bölgelere doğru akış yavaşlar ve bu durum muzlanma (düzlemsellik bozulması) gibi üretim hatalarına yol açabilir. Bu nedenle kalıp tasarımında sürtünme yüzeylerinin optimize edilmesi, et kalınlıklarının homojenleştirilmesi ve geçiş bölgelerinde radyüslerin artırılması önerilmektedir (11).



Şekil:3. Alüminyum Ekstrüzyon Optimize Edilen Kesit Örnekleri [35]

2.4 Tasarım Süreci ve Analiz Yöntemleri
Batarya taşıyıcı sistemlerin tasarımı, CAD tabanlı modelleme ve CAE analizleri ile gerçekleştirilmektedir. Tasarım sürecinde aşağıdaki kriterler dikkate alınmalıdır:

Ekstrüde Edilebilirlik: Profilin geometrik sınırları, et kalınlığı, radyüs geçişleri, yüzey kalitesi ve kaynak uygunluğu analiz edilmelidir.

Fonksiyonellik: Sızdırmazlık, hava akışı, NVH performansı, korozyon direnci, izolasyon ve temizlik kriterleri değerlendirilmelidir.

Üretilebilirlik: DIN EN 755-9 ve TS EN 12020-2 gibi ekstrüzyon tolerans standartları referans alınmalıdır. Talaşlı imalat bölgeleri için genellikle ISO 2768 toleransları uygulanmaktadır.

Montajlanabilirlik: Stack-up analizleri, tork değerleri, oturma yüzeyleri ve housing bölgeleri tanımlanmalı ve analiz çıktılarına göre standart dışı toleranslar gerekmedikçe tanımlanmalı, üretim ekipleri ile görüşülerek üretilebilirlik onayı alınmalı ve süreç boyunca takip edilmelidir.

CAE analizleri kapsamında statik mukavemet, modal analiz (doğal frekans), termal dağılım ve sızdırmazlık simülasyonları gerçekleştirilmeli ve ürünün uygunluğu doğrulanmalıdır (7).

2.5 Alt Komponentler ve Üretim Prosesleri
Batarya taşıyıcı sistemde yer alan alt komponentler aşağıda listelenmiştir:

Soğutma Plakası: Isı transfer katsayısının çeliklere göre genellikle çok daha yüksek olmasından dolayı alüminyum alaşımından üretilir ve genellikle boyutları, seri üretime uygunluğu ve maliyetinin uygun olması sebebiyle rollbonding ve brazing yöntemleri tercih edilmektedir (12).

HV Konnektör ve GND Kablosu: Elektriksel güvenlik için kritik bileşenlerdir; DFMEA analizlerinde yüksek risk puanları ile değerlendirilirler ve yüzey temasları, elektrik iletkenliklerini etkileyen mekanik unsurlar kritiktir.

Alt ve Üst Koruma Plakaları: Yapısal koruma ve yangın güvenliği konularında önemli parçalarlardır.

Tasarımlarının modal analiz ile ve malzemelerinin yangın ve hasar durumlarına karşı regülasyonların ve ana sanayilerin talep edebileceği ilave testler ve sanal analizler ile doğrulanmaları gerekmektedir. **Termal Kaçak Valfi:** Yangın ve patlama riskini azaltmak için basınç kontrolü sağlar. İç basınç ile dış basıncı dengeler.

Üretim adımları:

Kesme ve Kaynak: Genellikle FSW, gazaltı ve lazer kaynak gibi birleştirme yöntemleri tercih edilir fakat uygulanan bölgeye göre ilgili prosesin yeterliliği ve penetrasyon beklentisi ilgili testler ile doğrulanmalı ve frekansiyel olarak kontrol edilmelidir. Batarya taşıyıcıyı diğer ürünlerden farklı kılan asıl kriter tüm birleştirme yöntemlerinde ekstra olarak ve %100 sızdırmazlık testine tabii olmasıdır. Bu sebeple parametre ayarı ve çevresel faktörler göz önünde bulundurularak isterleri daima karşılayacak şekilde standartlaştırılmalıdır. FSW yöntemi, düşük deformasyon ve yüksek sızdırmazlık avantajı sunmakla beraber kaynak dikişinde malzemenin mukavemetine göre geleneksel kaynak metodlarına nazaran daha yüksek bir dayanım sağlar (13).

Yüzey İşlemleri: Elokso, statik toz boya ve katarforez gibi işlemler uygulanabilir. Seçilen alaşıma göre yüzey kaplamaya ihtiyaç duyulmayabilir. Bu nokta kararı etkileyen asıl faktör araç üretici firmanın korozyon beklenti seviyesidir. Genellikle tuz sisi testi uygulanır ancak firmaya göre test süresi değişkenlik gösterebilir (10).

Test ve Ölçüm: Sızdırmazlık testleri (helyum ve kuru hava), yüzey kalite kontrolleri, NVH performans testleri ve boyutsal doğruluk ölçümleri gerçekleştirilmeli ve kayıt altına alınmalıdır (14).

3. BULGULAR

Alüminyum ekstrüzyon teknolojisinin elektrikli araç batarya taşıyıcı sistemlerinde kullanımı, üretim süreçlerinden mekanik performansa, termal yönetimden korozyon direncine kadar çok boyutlu çıktılar sunar. Bu bölümde, yapılan tasarım ve üretim çalışmaları sonucunda elde edilen bulgular, literatürle desteklenerek detaylı biçimde sunulur.

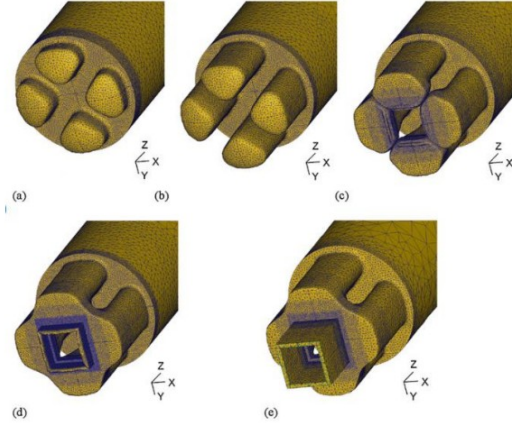
3.1 Geometrik Stabilite ve Üretim Süreci Bulguları

Alüminyum ekstrüzyon prosesinde biyet merkezinde akış hızı çevresel bölgelere göre daha yüksek gerçekleşir. Bu hız farkı, özellikle geniş kesitli profillerde muzlanma (düzlemsellik bozulması) olarak tanımlanan deformasyonlara yol açar (15). İç feder (dikme) yapılarının tasarıma entegre edilmesi, bu deformasyonları azaltmada etkili olur. Et kalınlığı dağılımı homojen

tutulduğunda, profil geometrisi daha stabil hale gelir.

Zıvanalı kalıplar kullanıldığında, biyet kaynak odasında yeniden birleşir. Bu birleşim noktasında soğuk kaynak, çatlak oluşumu ve lokal incelme gibi kusurlar gözlemlenir. Kalıp geometrisinin optimize edilmesi, bu tür kusurların oluşma olasılığını düşürür. Özellikle akış kanallarının simetrik ve dengeli tasarımı, birleşim kalitesini artırır (16).

Şekil:3 Zıvanalı kalıpta magnezyum alaşımı ekstrüzyonu sırasında metal akışı ve kaynak dikişi oluşumu üzerine sonlu elemanlar analizi [34]



3.2 Kaynak Performansı ve Sızdırmazlık
Friction Stir Welding (FSW) yöntemi, batarya taşıyıcı sistemlerde yüksek sızdırmazlık ve düşük deformasyon avantajı sunar (17). Yüksek hızda yapılan FSW uygulamalarında (örneğin 4–5 m/dk), kaynak bölgesinde tam penetrasyon ve yüzeyde flash-free görünüm elde edilir. Optik mikroskop analizleri, kaynak bölgesinde tane boyutlarının homojen dağıldığını ve mekanik dayanımın yüksek olduğunu gösterir.

FSW ile elde edilen birleşimlerde, sızdırmazlık testlerinde sccm (standard cm³ per minute) cinsinden kaçak değerleri gözlemlenir. Genellikle ana sanayinin (OEM) paylaştığı bu değer, endüstriyel kabul kriterlerinin altında kalır ve altındaki kaçaklar uygun parça olarak kabul edilir.

3.3 Termal Yönetim ve NVH Performansı
Alüminyumun çeliğe kıyasla çok daha yüksek termal iletkenlik sunması, batarya modüllerinin soğutma plakalarıyla entegrasyonunda avantaj sağlar (18). Rollbonding ve brazing yöntemleriyle üretilen soğutma plakaları, sıvı soğutma sistemleriyle birlikte kullanıldığında batarya yüzey sıcaklığını optimum seviyede tutmak için elverişlidir.

NVH (Ses, Titreşim, Dayanıklılık) analizlerinde, profil geometrisi, kaynak lokasyonları ve et

kalınlıkları kritik parametreler olarak değerlendirilir. Modal analiz sonuçları, alt ve üst kapaklarda doğal frekansların hedeflenen aralıkta bulunduğunu ve titreşim sönümlenme kapasitesinin yeterli düzeyde sağlandığını gösterir (19).

3.4 Boyutsal Doğruluk ve Yüzey Kalitesi
Boyutsal doğruluk, alüminyum ekstrüzyon profilleri için DIN EN 755-9 ve TS EN 12020-2 standartlarına göre değerlendirilir (20). Kritik dil yapılarında ölçü kararlılığı düşük kalır; bu nedenle yüksek tolerans gereksinimi doğar. Hollow (odacıklı) profil tasarımları, bu riski azaltmak için tercih edilir.

Yüzey kalitesi açısından, sızdırmazlık bölgelerinde ortalama pürüzlülük değerleri belirlenir. Bu değerler üzerindeki çizikler sızdırmazlık testinde belirtilen sccm değeri göz önünde bulundurulduğunda kaçak riski oluşturur. Elektriksel temas yüzeylerinde düzlemsellik ve paralellik korunması gerekir. Bu bölgelerde talaşlı imalat sonrası yüzey kontrolü yapılır.

3.5 Korozyon Direnci ve Malzeme Dayanımı
Alüminyum alaşımları, özellikle 6xxx serisi, doğal olarak pasif bir oksit tabakası oluşturur. Bu tabaka, nem ve klor iyonlarına karşı yüksek direnç sağlar. Anodizasyon gibi yüzey işlemleriyle bu direnç daha da artırılır (21). Özellikle deniz ortamı gibi zorlu koşullarda bile alüminyum alaşımlı batarya taşıyıcılar uzun ömürlü performans sunar.

Yapılan karşılaştırmalı çalışmalar, alüminyum alaşımlarının çelikten %40'a kadar daha hafif olduğunu ve korozyon oranlarının çeliğe göre çok daha düşük kaldığını gösterir. Bu özellik, hem araç menzilini artırır hem de bakım maliyetlerini azaltır (22).

4. TARTIŞMA

Bu çalışmada elde edilen bulgular, alüminyum ekstrüzyon teknolojisinin elektrikli araç batarya taşıyıcı sistemlerinde sunduğu teknik avantajları ve üretim verimliliğini açıkça ortaya koyar. Literatürdeki güncel araştırmalarla karşılaştırıldığında, bu teknolojinin hem yapısal hem de termal gereksinimleri karşılamada güçlü bir alternatif sunduğu görülür.

4.1 Literatürle Karşılaştırma ve Malzeme Seçimi
Alüminyum, özellikle 6xxx serisi alaşımlar, elektrikli araç batarya kutularında en yaygın kullanılan malzeme olarak öne çıkar (23). Constellium'un yaptığı çalışmalarda, 6000 serisi Al-Si-Mg-Cu alaşımlarının hem mekanik performans hem de geri dönüştürülebilirlik açısından optimum sonuçlar verdiği belirtilir (24). Bu alaşımlar, çelik eşdeğerlerine göre %30–40

arasında kütle avantajı sağlar ve yüksek mukavemetli 6111 alaşımı gibi özel temperler ile daha da optimize edilebilir.

Bununla birlikte, alüminyumun yüksek termal iletkenliği, yangın güvenliği açısından bir zafiyet oluşturabilir. Bu nedenle bazı OEM'ler, üst ve alt kapaklarda çelik veya kompozit malzemelere yönelir. Özellikle termal runaway senaryolarında, alüminyumun erime noktası (~630°C) kritik bir sınırlama oluşturur (25). Bu bağlamda, intumescent polimerler ve termoplastik kompozitler gibi alternatif malzemeler, yangın geciktirici özellikleriyle dikkat çeker (26).

4.2 Proses Parametrelerinin Etkisi

Ekstrüzyon prosesinde et kalınlığı homojenliği, radyüs geçişleri ve simetri gibi tasarım parametreleri, üretim sonrası oluşabilecek geometrik hataları (muzlanma, burulma, paralelkenarlaşma) doğrudan etkiler (27). Bu bulgular, Naview tarafından yayınlanan analizlerle örtüşür; burada ekstrüzyonun karmaşık şekillerde sınırlı olduğu ve dar geçişlerde çatlama riskinin arttığı vurgulanır.

FSW kaynak yöntemi, özellikle batarya taşıyıcı sistemlerde yüksek sızdırmazlık ve düşük deformasyon avantajı sunar. Literatürde, 4.0 m/dk hızla yapılan FSW uygulamalarında %71–72 kaynak verimi elde edildiği ve kaynak bölgesinde “U” şeklinde sertlik profili olduğu rapor edilir (28). Bu durum, geleneksel kaynak yöntemlerine göre daha homojen mekanik özellikler sunar.

4.3 Termal Yönetim ve NVH Performansı

Alüminyumun yüksek termal iletkenliği, batarya modüllerinin soğutulmasında avantaj sağlar. Ancak bu özellik, aynı zamanda dış ortamdan gelen ısıyı da iletmediği için termal izolasyon gerektirir. Bu nedenle, batarya taşıyıcı sistemlerde hem aktif hem pasif soğutma stratejileri entegre edilir. Novelis'in Gen-II batarya kutusu örneğinde, entegre soğutma plakaları ve yangına dayanıklı alt kapaklar kullanılarak bu sorunlar çözülür (29).

NVH performansı açısından, alüminyum ekstrüzyon profillerinin iç odacıklı yapısı, titreşim sönümleme ve doğal frekans kontrolü açısından avantaj sağlar. Özellikle modal analizlerle doğrulanan bu yapı, batarya taşıyıcının araç gövdesiyle uyumlu çalışmasını sağlar (19).

4.4 Avantajlar ve Sınır Koşulları

Avantajlar:

Hafiflik: Alüminyum, çeliğe göre %30–50 daha hafiftir.

Geri Dönüştürülebilirlik: Alüminyum, sonsuz kez geri dönüştürülebilir ve üretim enerjisi %95 oranında azalır.

İşlenebilirlik: Ekstrüzyon ile karmaşık kesitler üretilir; kaynaklanabilirlik ve yüzey işlemleri açısından esneklik sunar.

Sızdırmazlık: FSW gibi yöntemlerle yüksek sızdırmazlık sağlanabilir (30).

Sınır Koşulları:

Termal Riskler: Yüksek sıcaklıkta alüminyumun erimesi, yangın güvenliği açısından risk oluşturur.

Darbe Dayanımı: Alüminyum, çeliğe göre daha düşük darbe dayanımına sahiptir; bu nedenle bazı kritik bölgelerde ek takviye gerekebilir.

Karmaşık Geometri Sınırlamaları: Ekstrüzyon prosesinde keskin geçişler ve dar kanallar zor üretilir.

Maliyet: Özellikle özel alaşımlar ve zıvanalı kalıplar, üretim maliyetini artırabilir.

4.5 Endüstriyel Eğilimler ve Gelecek Yönelimler
Günümüzde OEM'ler, batarya taşıyıcı sistemleri doğrudan araç gövdesine entegre etmeye yönelir. Cell-to-chassis ve cell-to-pack mimarileri, modülerliği azaltırken yapısal entegrasyonu artırır (31). Bu durum, taşıyıcı sistemin sadece koruyucu değil, aynı zamanda yük taşıyıcı bir eleman olarak tasarlanmasını gerektirir.

Gelecekte, katı hal batarya teknolojilerinin yaygınlaşmasıyla birlikte taşıyıcı sistemlerin yapısal gereksinimleri değişebilir. Bu durumda, alüminyumun rolü yeniden tanımlanabilir. Ayrıca, LCA çalışmaları alüminyumun çevresel avantajlarını ortaya koyar; geri dönüştürülmüş alüminyum kullanımıyla CO₂ emisyonlarında %10–15 azalma sağlanabilir (32).

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, elektrikli araç batarya taşıyıcı sistemlerinde alüminyum ekstrüzyon teknolojisinin tasarım, üretim ve performans açısından rolü kapsamlı biçimde değerlendirilmiştir. Yapılan incelemeler ve bulgular şu şekilde özetlenebilir:

Hafiflik ve yapısal bütünlük: 6xxx serisi alüminyum alaşımları, çeliğe kıyasla %30–50 oranında kütle avantajı sağlayarak araç menziline doğrudan katkıda bulunmaktadır.

Termal ve NVH performansı: Yüksek ısı iletkenlik ve odacıklı profil geometrileri sayesinde batarya modüllerinde etkin soğutma sağlanmakta, titreşim davranışları hedeflenen frekans aralıklarında kontrol altına alınabilmektedir.

Birleştirme teknolojileri ve sızdırmazlık: FSW uygulamaları, düşük deformasyon ve yüksek

sızdırmazlık kriterlerini karşılamada öne çıkmıştır. Sızdırmazlık testlerinde endüstriyel kabul kriterlerinin altında değerler elde edilmiştir.

Üretim süreçleri: Ekstrüzyon prosesinde kalıp tasarımı, et kalınlığı homojenliği ve akış simetrisi; geometrik doğruluk, yüzey kalitesi ve üretim hataları üzerinde belirleyici faktörlerdir.

Korozyon direnci ve sürdürülebilirlik: Alüminyumun doğal oksit tabakası ve anodizasyon gibi yüzey işlemleri, uzun ömürlü kullanım ve geri dönüşüm kabiliyeti açısından önemli avantajlar sunmaktadır.

Bununla birlikte, çalışmada öne çıkan bazı sınırlılıklar da dikkat çekmektedir: Alüminyumun düşük ergime sıcaklığı, yangın güvenliği açısından sınırlayıcıdır. Çarpışma senaryolarında çeliğe göre daha düşük darbe dayanımı göstermektedir. Ekstrüzyon prosesinde dar geçişler ve karmaşık geometrilerde üretim zorlukları yaşanmaktadır.

Öneriler

Hibrit tasarımlar: Alüminyum ekstrüzyon profillerinin çelik veya kompozitlerle birlikte kullanılması, darbe dayanımı ve yangın güvenliği gibi kritik gereksinimleri karşılayacaktır.

Proses optimizasyonu: Kalıp tasarımlarında akış kanallarının dengeli kurgulanması ve et kalınlığı dağılımının homojen tutulması, üretim sonrası deformasyonların azaltılmasını sağlayacaktır.

İleri kaynak teknolojileri: FSW ve lazer hibrit kaynak yöntemlerinin geliştirilmesi, hem sızdırmazlık performansını hem de yapısal dayanımı artıracaktır.

Yangın güvenliği ve izolasyon: Termal runaway risklerine karşı yangın geciktirici kaplamalar, seramik bariyerler veya intumescent malzemelerle takviye edilmesi önerilmektedir.

Sürdürülebilirlik: Geri dönüştürülmüş alüminyum kullanımı ve LCA çalışmalarının yaygınlaştırılması, çevresel etkilerin azaltılmasına katkı sağlayacaktır.

Gelecek yönelimler: Cell-to-pack ve cell-to-chassis mimarilerinde taşıyıcı sistemin doğrudan yapısal eleman haline gelmesi öngörülmektedir. Bu nedenle, alüminyum ekstrüzyonun yapısal entegrasyona uygun şekilde geliştirilmesi kritik olacaktır.

Sonuç olarak, alüminyum ekstrüzyon teknolojisi; hafiflik, üretim esnekliği, termal yönetim ve geri dönüştürülebilirlik açısından elektrikli araç batarya

taşıyıcı sistemlerinde güçlü bir alternatif sunmaktadır. Ancak darbe dayanımı, yangın güvenliği ve proses limitlerinin aşılması için hibrit malzeme çözümleri ve ileri üretim teknikleriyle desteklenmesi gerekmektedir.

6. REFERANSLAR

[1] Koundal, S., Sharma, S. L., & Debbarma, A. (2025). Battery thermal management systems for electric vehicles: an overview of cooling techniques and performance optimization. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*.

[2] Kerspe, J., & Fischer, M. (2019). Requirements for battery enclosures – Design considerations and practical examples. Springer Fachmedien Wiesbaden. https://doi.org/10.1007/978-3-658-25939-6_108

[3] Czerwinski, F. (2024). Aluminum alloys for electrical engineering: a review. *Journal of Materials Science*. <https://doi.org/10.1007/s10853-024-09890-0>

[4] Kneuper, F., Neumann, S., Schulze, A., Otroshi, M., Tekkaya, A. E., & Meschut, G. (2024). Mechanically Joined Extrusion Profiles for Battery Trays. *Automotive Innovation*.

[5] Giarmas, E., & Tzetzis, D. (2022). Optimization of die design for extrusion of 6xxx series aluminum alloys through finite element analysis: a critical review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*.

[6] Nikzad Khangholi, S., Javidani, M., Maltais, A., & Chen, X. G. (2022). Review on recent progress in Al–Mg–Si 6xxx conductor alloys. *Journal of Materials Research*, 37, 670–691.

[7] Bryantsev, P. Y. (2012). Design and experimental study of phase composition and structure of aluminum alloys of series 6XXX. *Metal Science and Heat Treatment*, 54(3–4), 20–23.

[8] Satheesh Kumar, S., & Ragupathi, P. (2024). Comparative Study of Characteristics and Applications of Aluminum Alloy Series. *Proceedings of ICRAMST*, 2, 353–362.

[9] Lumley, R. N. (2014). Heat Treatment of Aluminum Alloys. *Encyclopedia of Thermal Stresses*, 2190–2203.

[10] Jin, M., Lee, B., Yoo, J., Jo, Y., & Lee, S. (2024). Cryogenic Deformation Behaviour of Aluminium Alloy 6061-T6. *Metals and Materials International*, 30, 1492–1504.

- [11] Ma, Z., Shu, X., Xu, H., Wang, G., Tong, F., Li, Z., Chen, K., Li, G., & Li, B. (2024). Optimization of porthole extrusion die for 6063 aluminum alloy profile. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 24, Article 85.
- [12] Lombardi, A., Byczynski, G., Dmitrienko, A., Dao, M., & Vukotic, V. N. (2024). Analysis of Aluminum–Cerium Based Conductor Die-Casting Alloys for High Performance EV Powertrain Applications. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 55, 4704–4720.
- [13] Orlando, M., De Maddis, M., Razza, V., & Lunetto, V. (2024). Non-destructive detection and analysis of weld defects in dissimilar pulsed GMAW and FSW joints. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 132, 2957–2970.
- [14] Kneuper, F., Neumann, S., Schulze, A., Otroshi, M., Tekkaya, A. E., & Meschut, G. (2024). Mechanically Joined Extrusion Profiles for Battery Trays. *Automotive Innovation*, 7, 182–193.
- [15] Neumann, S., & Karhausen, K. F. (2011). Through process effects on final Al-sheet flatness. In S. J. Lindsay (Ed.), *Light Metals 2011* (pp. 625–630). Springer, Cham.
- [16] Reggiani, B., Pinter, T., & Donati, L. (2020). Scrap assessment in direct extrusion. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 107, 2635–2647.
- [17] Choudhary, A. K., & Jain, R. (2021). Fundamentals of Friction Stir Welding, Its Application, and Advancements. In *Welding Technology* (pp. 41–90). Springer.
- [18] Zhang, A., & Li, Y. (2023). Effect of alloying elements on thermal conductivity of aluminum. *Journal of Materials Research*, 38, 2049–2058.
- [19] Cardillo, M., Di Marco, F., & Ronzio, F. (2020). Integrated NVH Design of High-voltage Battery Systems for BEVs. *ATZ worldwide*, 122, 52–58.
- [20] Leśniak, D., Zasadziński, J., Libura, W., et al. (2024). Latest advances in extrusion processes of light metals. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 24, Article 184.
- [21] Elkilany, H. A., Shoeib, M. A., & Abdel-Salam, O. E. (2019). Influence of Hard Anodizing on the Mechanical and Corrosion Properties of Different Aluminum Alloys. *Metallography, Microstructure, and Analysis*, 8, 861–870.
- [22] Shaw, B. A., McCosby, M. M., Abdullah, A. M., & Pickering, H. W. (2001). The localized corrosion of Al 6XXX alloys. *JOM*, 53, 42–46.
- [23] Czerwinski, F. (2024). Aluminum alloys for electrical engineering: a review. *Journal of Materials Science*, 59, 14847–14892.
- [24] List, J., Rebuffet, O., & Schwarz, K. (2020). Metallurgische und Design-innovationen für die Entwicklung von Aluminium-Batteriegehäusen. *ATZ Automobiltechnische Zeitschrift*, 122, 60–65.
- [25] Song, L., Zheng, Y., Xiao, Z., Wang, C., & Long, T. (2021). Review on Thermal Runaway of Lithium-Ion Batteries for Electric Vehicles. *Journal of Electronic Materials*, 50, 9281–9300.
- [26] Kong, L., Li, Y., & Feng, W. (2021). Strategies to Solve Lithium Battery Thermal Runaway: From Mechanism to Modification. *Electrochemical Energy Reviews*, 4, 633–679.
- [27] Lu, Y., Mao, H., & Zhou, M. (2023). Topology optimization of electric vehicle chassis structure with distributed load-bearing batteries. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 66, Article 134.
- [28] Choudhary, A. K., & Jain, R. (2021). Fundamentals of Friction Stir Welding, Its Application, and Advancements. In *Welding Technology* (pp. 41–90). Springer.
- [29] Koundal, S., Sharma, S. L., & Debbarma, A. (2025). Battery thermal management systems for electric vehicles: an overview of cooling techniques and performance optimization. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 150, 5855–5882.
- [30] Kavathia, K., & Badheka, V. (2022). Application of Friction Stir Welding (FSW) in Automotive and Electric Vehicle. In *Recent Advances in Mechanical Infrastructure* (pp. 289–304). Springer.
- [31] Kohs, A., & Brachtendorf, R. (2023). Cell-to-pack – Potentials of Compact Battery Design along the Lifecycle. *ATZ worldwide*, 125, 40–43.
- [32] Li, J., Zhou, J., Wang, W., Chen, M., Zheng, W., Yang, W., Zou, H., & Chen, S. (2024). LCA for lithium battery recycling technology – recent progress. *Ionics*, 30, 4417–4428.
- [33] H. Al-jabbouli, Ebubekir Koç, A. Akça (2015). Classification of Main Faults in the Production Process of Extruded Aluminium Profiles

[34] Liu, G., Zhou, J., & Duszczuk, J. (2008). FE analysis of metal flow and weld seam formation in a porthole die during the extrusion of a magnesium alloy into a square tube and the effect of ram speed on weld strength. *Journal of Materials Processing Technology*, 200(1–3), 185–198.

[35] WinterZhu, “Custom Aluminum Extrusion DFM,” WinterZhu, [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://winterzhu.com/custom-aluminum-extrusion-dfm/>.

[36] Aluminum Extruders Council. (2015). Using Aluminum Extrusions to Meet Challenge of Sustainable Buildings.s.16

Elektrikli Araç Bataryaların Üretim ve Kullanım Süreçlerinin Su ve Karbon Ayak İzi Açısından Değerlendirilmesi

GİZEM ÇALIŞKAN

E-Posta: 502404013@ogr.uludag.edu.tr

Prof. Dr. S. SİDDİK CİNDORUK

E-Posta: cindoruk@uludag.edu.tr

Özet

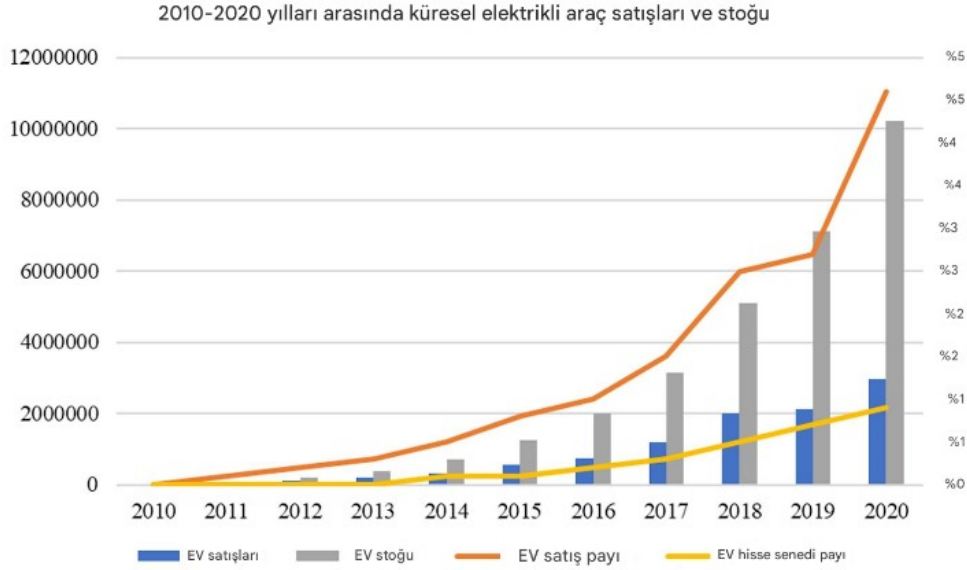
Artan sera gazı emisyonları, fosil yakıt bağımlılığı ve hızla ilerleyen kentleşme süreci, ulaşım sektöründe düşük karbonlu çözümlere yönelimi zorunlu kılmakta ve bu bağlamda elektrikli araçları sürdürülebilir ulaşım stratejilerinin merkezine yerleştirmektedir. İçten yanmalı motorlu taşıtların neden olduğu yüksek karbon salımı, hava kirliliği ve enerji verimsizliği, elektrikli araçların çevresel ve ekonomik açıdan daha avantajlı bir seçenek olarak öne çıkmasına neden olmaktadır. Bununla birlikte, elektrikli araçların gerçek sürdürülebilirlik potansiyeli büyük ölçüde batarya teknolojilerine bağlıdır; zira batarya sistemleri yalnızca menzil, performans ve maliyet gibi teknik unsurları değil, aynı zamanda karbon ve su ayak izini belirleyen temel faktörleri de içermektedir. Batarya kimyaları arasında önemli çevresel farklılıklar söz konusudur: LFP bataryalar daha düşük nikel ve kobalt içeriği sayesinde görece çevre dostu bir üretim süreci sunarken, NMC bataryalar yüksek enerji yoğunluğuna rağmen kobalt ve nikel madenciliği nedeniyle önemli çevresel yükler oluşturmaktadır. LTO bataryalar uzun ömür ve hızlı şarj avantajı sağlamasına karşın düşük enerji yoğunluğu nedeniyle sınırlı bir kullanım alanına sahiptir; katı hal bataryalar ise hâlen geliştirilme aşamasındadır. Batarya üretim süreçleri, özellikle hammadde çıkarımı ve enerji yoğun katot-anot işlemleri, toplam karbon ayak izinin büyük bölümünü oluşturmakta; üretimin kömür temelli enerji sistemlerine dayalı olduğu bölgelerde bu etki daha da artmaktadır. Kullanım aşamasındaki çevresel etkiler ise şarjda kullanılan elektrik kaynağına bağlı olarak değişmekte, yenilenebilir enerji kullanımında karbon ve su ayak izleri önemli ölçüde azalmaktadır. Bataryaların ömrünü tamamlamasının ardından gelen geri dönüşüm süreçleri ise doğal kaynak kullanımını azaltarak çevresel yükü hafifletmekte, özellikle NMC bataryalar değerli metallerin geri kazanımıyla avantaj sağlamaktadır. Sonuç olarak, bataryaların çevresel performansı yalnızca kullanım aşamasıyla sınırlı olmayıp, üretimden geri dönüşüme uzanan tüm yaşam döngüsü bağlamında değerlendirilmelidir.

Anahtar Kelimeler: Lityum-iyon batarya, karbon ayak izi, su ayak izi, yaşam döngüsü değerlendirmesi, NMC, LFP, sürdürülebilirlik

1. Giriş

Küresel iklim değişikliği, toplum için giderek artan bir tehdit oluşturmaktadır. Karbondioksit başta olmak üzere sera gazlarının yol açtığı sıcaklık artışı, buzulların erimesi, deniz seviyesinin yükselmesi ve ekosistemlerin bozulması gibi çevresel sorunlar, acil önlemler alınmasını gerektirmektedir [1]. Bu çerçevede, Paris Anlaşması kapsamında 1,5 °C'lik sıcaklık artışının sınırlandırılması hedeflenmiş ve 190'dan fazla ülke, ulusal olarak belirlenmiş katkılar aracılığıyla sera gazı emisyonlarını azaltmayı taahhüt etmiştir [2]. Bu küresel çerçevede, ulaşım sektörü dünya genelinde karbon emisyonlarının ikinci en büyük kaynağı olarak öne çıkmakta ve bu nedenle elektrikli araçların yaygınlaştırılması, içten yanmalı motorlu araçların yerine geçmesi stratejisinde kritik bir rol oynamaktadır [3,4,5]. Elektrikli araç bataryaları, fosil yakıtlı taşıtlara kıyasla karbon ve hava kirlenici emisyonlarını azaltırken, daha düşük su tüketimi ve çevresel yük sağlamaları sayesinde sürdürülebilir ulaşım sistemlerinin gelişiminde kritik bir rol oynamaktadır [6,7]. Bu çalışma, elektrikli araç bataryalarının üretim ve kullanım esnasında karbon ve su ayak izini kapsamlı bir şekilde değerlendirmeyi amaçlamaktadır.

Elektrikli araçların çevresel performansı büyük ölçüde batarya teknolojisinin özelliklerine bağlıdır. Lityum iyon piller (Li-ion), yüksek enerji yoğunluğu, uzun kullanım ömrü, düşük kendi kendine deşarj oranı ve bakım kolaylığı gibi avantajları nedeniyle elektrikli araçlarda öncelikli tercih olarak kullanılmakta ve talep hızla artmaktadır [8,9]. 10 yıllık hızlı bir gelişmenin ardından, Şekil 1'de görüldüğü gibi 2020 yılı sonuna kadar dünya çapında 10 milyon elektrikli araç kullanıma girmiştir. 2020 sonunda dünya genelinde yaklaşık 10 milyon elektrikli araç kullanımda olup, satışların 2025'te 18 milyon ve



Şekil 1. 2010'dan 2020'ye küresel elektrikli araç satışları ve stoğu [11].

2030'da 21 milyon seviyesine ulaşması öngörülmektedir [10,11]. Bununla birlikte, Li-ion pil üretimi, nadir bulunan hammadde kullanımı, yüksek enerji tüketimi ve dolaylı sera gazı emisyonları nedeniyle çevresel ve etik sorunlar yaratmaktadır; özellikle kobalt madenciliği ile ilişkili sosyal sorunlar ve yüksek karbon ayak izi öne çıkmaktadır [12,13]. Redoks Akış ve Sodyum-İyon gibi alternatif batarya teknolojileri, uzun ömür, değiştirilebilir elektrolit yapısı ve lityum kaynaklarına olan bağımlılığı azaltma avantajlarıyla öne çıkmaktadır. Bu özellikleri sayesinde maliyet ve karbon ayak izi açısından önemli kazanımlar sunabilmesine rağmen düşük enerji yoğunluğu ve sınırlı ölçeklenebilirlikleri yaygın uygulamalarını kısıtlamaktadır [14,15].

Elektrikli araçların karbon ayak izi yalnızca batarya üretimi ile sınırlı değildir; kullanım ve geri dönüşüm aşamaları da önemli bir etkiye sahiptir. Aracın şarj edildiği enerji kaynağı, toplam emisyonu belirleyen en kritik faktörlerden biridir. Yenilenebilir enerji ile şarj edilen elektrikli araçlar, fosil yakıt temelli enerjiye kıyasla çok daha düşük emisyon üretirken, kömür ağırlıklı enerji ile şarj edilen araçlar, kullanım aşamasında içten yanmalı motorlu araçlardan daha yüksek karbon salımı oluşturabilmektedir [16,17,18]. Batarya paketinin ağırlığı, entegre elektronik sistemleri ve enerji tüketimi, yaşam döngüsü emisyonlarını artıran diğer faktörler arasında yer almaktadır [19]. Bu nedenle, batarya üretimi, kullanım ve geri dönüşüm süreçlerinin ayrıntılı olarak incelenmesi, elektrikli araç üreticilerinin yüksek karbon emisyonlu adımları tespit ederek ömür boyu karbon ayak izini azaltacak stratejiler geliştirmesine imkân tanımaktadır [20,21].

Elektrikli araçların çevresel etkileri sadece karbon ayak izi ile sınırlı değildir; tatlı su kaynakları üzerindeki etkiler de yaşam döngüsü boyunca dikkate alınmalıdır. Dünya tatlı su kaynakları sınırlı olup, hem insan yaşamı hem de ekonomik ve sosyal gelişim için kritik öneme sahiptir [22,23]. Artan su talebi ve sınırlı kaynaklar, birçok ülkede ciddi su kıtlığı riskine yol açmakta ve şehirleşme, sanayi ile yaşam standartlarının gelişimini doğrudan etkilemektedir [24,25]. Ulaşım sektörü, enerji ve su tüketimi açısından önemli bir paya sahip olup, yaşam döngüsü perspektifinden bakıldığında su tüketiminde artışa sebep olmaktadır [26,27,28]. Özellikle Çin'de endüstriyel su kullanımı yüksek seviyelerde olup, araç ve yakıt üretim süreçleri toplam su çekiminin önemli bir kısmını oluşturmaktadır [29]. Yaşam döngüsü analizleri, Volkswagen modellerinde üretim aşamasının su tüketiminin %95'ten fazlasını oluşturduğunu ve elektrikli araçlarda yaşam döngüsü su tüketiminin benzinli araçlara göre daha yüksek olabileceğini göstermektedir [29,30]. Ayrıca, yakıt hücresi ve doğal gazlı araçların üretim süreçleri ve hidrojen üretim yöntemleri, yaşam döngüsü su tüketimini önemli ölçüde etkilemektedir [31,32,33,34].

Sonuç olarak, elektrikli araçların çevresel sürdürülebilirliği, karbon ve su tüketimi boyutları birlikte ele alınmalıdır. Üretim, kullanım ve geri dönüşüm aşamalarındaki potansiyel emisyon ve su tüketimi kaynaklarının ayrıntılı değerlendirilmesi, hem elektrikli araçların gerçek çevresel etkisini ortaya koyacak hem de batarya teknolojisi, enerji kaynakları ve su tasarrufu önlemleri için yol gösterici olacaktır. Bu yaklaşım, ulaşım sektörünün sera gazı emisyonlarını ve tatlı su kaynakları üzerindeki yükünü azaltarak daha sürdürülebilir bir ulaşım sistemine katkı sağlayacaktır.

2. Elektrikli Araç Bataryalarının Üretim Sürecinde Çevresel Etkileri

Elektrikli araçlarda kullanılan bataryaların üretim aşamaları, hammadde çıkarımından hücre montajına kadar uzanan çok katmanlı süreçlerden oluşmakta ve bu süreçlerin çevresel etkileri giderek artan bir öneme sahiptir. Lityum, kobalt ve nikel gibi kritik metallerin madenciliği, hem enerji ve su kullanımı yoğunluğu hem de ekosistem üzerinde ciddi baskılar yaratmaktadır [35]. Üretim sürecinde kullanılan enerji kaynağının karbon yoğunluğu ise toplam sera gazı emisyonlarının belirlenmesinde kritik bir rol oynar [36]. Yaşam döngüsü analizleri, bataryaların üretim aşamasının toplam karbon ayak izinin %56–70’lik kısmını oluşturduğunu göstermektedir [37, 38]. Bu nedenle, batarya üretim süreçlerinin çevresel etkilerinin ayrıntılı biçimde incelenmesi ve sürdürülebilir üretim stratejilerinin geliştirilmesi açısından büyük önem taşımaktadır.

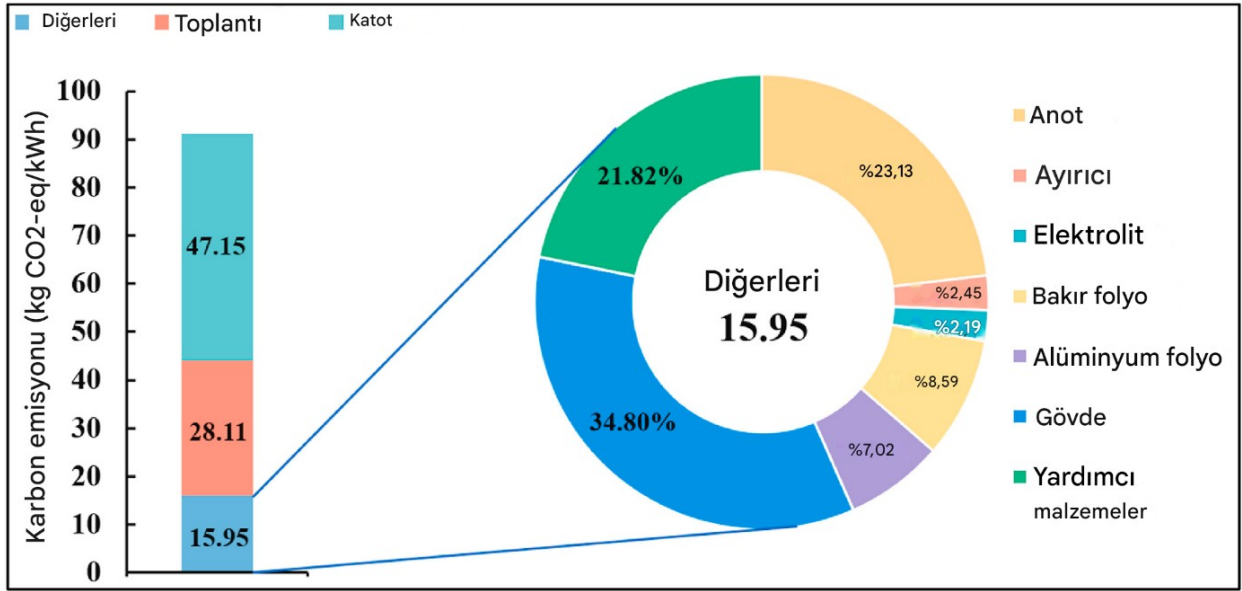
Batarya üretiminde kullanılan hammaddelerin çıkarımı, hem karbon hem de su ayak izi açısından yoğun süreçlerdir. Özellikle tuzlu su havzalarından buharlaştırma yöntemiyle gerçekleştirilen lityum üretimi, yüz binlerce litre tatlı su tüketimine yol açmakta ve bölgesel su kıtlığına sebep olmaktadır [39]. Kobalt ve nikel madenciliği de yalnızca yüksek enerji kullanımına değil, aynı zamanda yoğun su tüketimi ve atık su oluşumuna neden olarak çevresel yükü artırmaktadır [40]. Bu nedenle, hammadde çıkarım aşamasında su yönetimi ve enerji optimizasyonu, sürdürülebilir batarya teknolojileri için kritik bir öneme sahiptir. Örneğin, yaşam döngüsü analizi yapılan çalışmalarda, benzinli araçlar için üretim ve işletme aşamasında sırasıyla 275 m³ ve 137 m³ su tüketimi hesaplanmışken, elektrikli Ford Focus için bu değerler 851 m³ ve 262 m³ olarak benzinli bir araca kıyasla %90 daha fazla bulunmuştur. Üretim aşaması toplam su tüketiminin büyük çoğunluğunu oluşturmaktadır [29]. Yakıt hücresel ve doğal gazlı araçlar da düşük emisyon ve yüksek verimlilik avantajlarına sahip olsalar da, üretim ve yakıt elde etme süreçleri su ve enerji talebi açısından dikkatle değerlendirilmelidir [41].

Elektrikli araçlara olan talebin artması, özellikle Demokratik Kongo Cumhuriyeti, Şili ve Endonezya gibi gelişmekte olan ülkelerde metal madenciliğini yoğunlaştırmakta; su kaynaklarının tükenmesi, kirlenmesi ve ormansızlaşma gibi çevresel etkileri artırmaktadır. Örneğin, Şili’nin Salar de Atacama bölgesinde lityum üretimi, bölgenin tatlı su kaynaklarının yaklaşık %65’ini tüketmekte ve bir ton lityum üretimi için 400.000 ila 2 milyon litre su gerekmektedir [42].

Batarya üretiminde hücre üretimi, elektrot kaplama, kurutma ve elektrolit doldurma gibi işlemler yüksek miktarda elektrik gerektirir; bu nedenle, enerji

kaynağının karbon yoğunluğu, üretim sürecinden kaynaklanan sera gazı emisyonlarını doğrudan etkiler. Örneğin, 24 kWh kapasiteli bir Ford Focus lityum-iyon pilinde üretim, toplam sera gazı emisyonlarının yaklaşık %45’ini oluşturmaktadır [43]. Katot aktif malzemeleri, işlenmiş alüminyum ve elektrolit bu süreçte temel katkı maddeleridir; vakumlu kurutma ve kaplama kurutma ise yüksek enerji tüketimi nedeniyle çevresel yükü artırır [44,45,46]. Meta-analizler, lityum-iyon batarya üretiminin ortalama 17–20 kg CO₂-eq/kg emisyonu yol açtığını göstermektedir [36]. Kömür ağırlıklı enerji karışımına sahip bölgelerde karbon ayak izi belirgin biçimde artarken, yenilenebilir enerji kullanımının yoğun olduğu tesislerde değerler önemli ölçüde düşer [40]. Ayrıca hammadde işleme, nakliye ve montaj gibi tedarik zinciri aşamaları toplam karbon yükünü artırır; bu nedenle üretim ve tedarik süreçlerinin bütüncül optimizasyonu büyük önem taşımaktadır [38,47].

Farklı batarya türleri, kullanılan hammaddeler, üretim süreçlerinin enerji gereksinimleri ve geri dönüşüm potansiyelleri nedeniyle karbon ve su ayak izi açısından birbirinden ayrılmaktadır. Lityum-iyon bataryalar, yüksek enerji yoğunluğu ve uzun çevrim ömrü sayesinde elektrikli araçlarda baskın teknoloji haline gelmiştir [48]. Ancak lityum, kobalt ve nikel gibi kritik hammaddelerin çıkarılması ve işlenmesi sırasında ortaya çıkan yüksek enerji tüketimi ve çevresel baskılar, bu bataryaların üretim aşamasındaki en önemli dezavantajdır [38]. LFP (Lityum ferrosülfat) bataryalar, nikel ve kobalt içeriği düşük olduğu için hammadde çıkarımında daha düşük su ve karbon ayak izine sahipken, NMC (Lityum Nikel Manganez Kobalt Oksit) bataryalar yüksek enerji yoğunluğu sunmasına rağmen kobalt içerikleri nedeniyle daha yüksek çevresel etkiler oluşturmaktadır. LTO (Lityum titanat oksit) bataryalar aşırı uzun çevrim ömrü ve hızlı şarj kapasitesi ile öne çıksa da düşük enerji yoğunlukları nedeniyle sınırlı kullanım alanına sahiptir [37,49,50]. Özellikle katot malzemelerinin üretimi, toplam karbon emisyonunun yarısından fazlasını oluşturmaktadır. Örneğin, katot malzemelerinin üretiminden %51,69 emisyon kaynaklanmakta; nikel, kobalt ve lityumun çıkarımı ve işlenmesi bu katkının temel nedenidir [51,52]. Pil montaj aşaması ise Şekil 2’de gösterildiği gibi 28,11 kg CO₂-eq/kWh ile ikinci en önemli emisyon kaynağıdır ve Çin’in fosil yakıt ağırlıklı elektrik karışımı bu değeri artırmaktadır. Diğer bileşenler (anot, ayırıcı, elektrolit, bakır ve alüminyum folyo, muhafaza ve yardımcı malzemeler) toplamda 15,95 kg CO₂-eq/kWh katkı sağlamaktadır; özellikle alüminyum muhafaza ve grafit anot, yüksek enerji tüketimi nedeniyle karbon emisyonlarını artıran başlıca unsurlardandır [53].



Şekil 2. Pil üretimi sırasında karbon emisyonları [53].

Nikel-metal hidrit (NiMH) bataryalar, enerji yoğunluğu bakımından lityum-iyon bataryaların gerisinde kalmakta, ayrıca nadir toprak elementleri ve yüksek enerji gerektiren üretim süreçleri nedeniyle karbon ve su ayak izine kayda değer katkı sağlamaktadır [54]. Yapılan çalışmalar, NiMH bataryaların sera gazı emisyonu, tatlı su ekosistemine toksisite ve ötrofikasyon gibi çevresel etkiler bakımından en olumsuz seçeneklerden biri olduğunu göstermektedir [55,56]. Buna karşın kurşun-asit bataryalar, düşük maliyetleri ve yüksek geri dönüşüm oranları sayesinde çevresel yükü belirli ölçüde azaltabilmektedir. Ancak kurşun işleme ve bertaraf süreçleri, karbon emisyonlarının artmasına ve su kaynaklarının kirlenmesine yol açabilmektedir [57]. Günümüzde ise yüksek enerji yoğunluğu ve daha düşük işletme maliyeti nedeniyle Li-ion bataryalar öne çıkmakta, elektrikli araçlarda yaygın olarak tercih edilmektedir [58].

Son yıllarda ise sodyum-iyon ve katı hâl bataryalar gibi alternatif teknolojiler öne çıkmaya başlamıştır. Bu bataryalar, daha bol ve erişilebilir hammaddelerden üretilibilmeleri sayesinde teorik olarak daha düşük karbon ve su ayak izi sunma potansiyeline sahiptir [59,60,61]. Örneğin Wang ve arkadaşları [62] yaptıkları çalışmada, Li-O₂, sodyum iyon ve Li-S pillerin karbon ayak izlerinin mevcut NMC ve LFP pillerden daha düşük olduğunu ve özellikle Li-O₂ pillerin en düşük karbon ayak izine sahip olduğunu, sodyum iyon pillerin ise Li-ion pillere kıyasla biraz daha düşük karbon ayak izi gösterdiğini ortaya koymuştur. Bununla birlikte, henüz ticari olgunluğa ulaşmamış olmaları nedeniyle bu teknolojilerin çevresel etkileri konusunda sınırlı veri bulunmaktadır. Dolayısıyla, gerçek çevresel performanslarının belirlenebilmesi için kapsamlı yaşam döngüsü analizlerine ihtiyaç duyulmaktadır.

Tablo 1’de özetlendiği üzere, batarya türlerinin avantajları ve dezavantajları yalnızca teknik performans açısından değil, aynı zamanda çevresel sürdürülebilirlik bağlamında da değerlendirilmelidir. Lityum-iyon bataryalar günümüzde baskın teknoloji olsa da, alternatif pil çeşitleri üzerine yapılan araştırmalar gelecekte daha çevre dostu ve sürdürülebilir enerji depolama çözümlerine yönelimin artacağını göstermektedir.

Batarya üretim süreçlerinin karbon ve su ayak izi üzerindeki etkileri göz önüne alındığında, sürdürülebilir mobilite hedeflerine ulaşmak için hammadde çıkarımından üretim tesislerinin enerji kaynaklarına kadar tüm aşamalarda optimizasyon yapılması gerekmektedir. Yenilenebilir enerji kullanımı, geri dönüşüm potansiyelinin artırılması ve çevresel etkisi düşük alternatif batarya teknolojilerinin geliştirilmesi, elektrikli araçların çevresel performansını iyileştirecek kritik stratejiler olarak öne çıkmaktadır.

3. Farklı Ülkelerde Elektrikli Araç Kullanımının Çevresel Etkileri

Ülkelere göre elektrikli araçların çevresel etkileri incelendiğinde, karbon ve su emisyonlarındaki farklılıkların başlıca nedeni, elektrik üretiminde kullanılan enerji kaynaklarının çeşitliliğidir. Fosil yakıt ağırlıklı şebekelerde, elektrikli araçlar işletme aşamasında düşük emisyon sağlasa da, dolaylı olarak karbon ve su ayak izi yüksek olmaktadır. Buna karşın, hidroelektrik, rüzgar ve güneş gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının yoğun kullanıldığı ülkelerde, elektrikli araçların yaşam döngüsü boyunca karbon ve su emisyonları önemli ölçüde azalır. Ayrıca, nükleer enerji ile elektrik üreten ülkelerde karbon emisyonları düşük olmakla

Tablo 1. Farklı Batarya Türlerinin Karşılaştırılması

Batarya Türü	Avantajları	Dezavantajları	Çevresel Etkiler	
Lityum-İyon (Li-ion)	Yüksek enerji yoğunluğu, uzun çevrim ömrü, hızlı şarj imkânı	Hammadde temini sorunlu (Li, Co, Ni), maliyetli üretim, güvenlik riskleri	Yüksek karbon ve su ayak izi; hammadde madenciliği ciddi ekolojik baskılar oluşturur	(Nitta vd., 2015)
Nikel-Metal Hidrit (NiMH)	Dayanıklı, daha güvenli, geri dönüşüm süreçleri daha gelişmiş	Daha düşük enerji yoğunluğu, daha ağır, hibrit araçlarla sınırlı kullanım	Daha az çevresel risk; ancak nikel madenciliği toksik yan ürünler doğurabilir	(Pistoia 2010)
Kurşun-Asit	Düşük maliyet, olgun teknoloji, yüksek geri dönüşüm oranı	Çok ağır, düşük enerji yoğunluğu, sınırlı ömür	Kurşun madenciliği ve atıkları ciddi çevresel kirlilik riski yaratır	(Garche ve ark., 2017)
Sodyum-İyon	Lityuma alternatif, hammaddesi bol ve ucuz, daha güvenli	Henüz ticari olgunluk aşamasında değil, enerji yoğunluğu düşük	Daha düşük çevresel baskı; su ve toprak kirliliği açısından lityuma göre avantajlı	(Sangsinorn ve ark., 2024)
Katı Hâl Batarya	Potansiyel olarak daha yüksek enerji yoğunluğu	Henüz erken geliştirme aşamasında, yüksek maliyet	Daha uzun ömürlü olma potansiyeliyle toplam çevresel etkiyi azaltabilir	(Machin ve ark., 2024).

birlikte, soğutma süreçlerinde yüksek su tüketimi ve radyoaktif atık yönetimi gibi çevresel etkiler ortaya çıkabilmektedir [6,50]. Bu bağlamda, elektrikli araçların çevresel performansı yalnızca batarya teknolojisine değil, ulusal enerji üretim portföyüne, enerji verimliliğine ve geri dönüşüm altyapısına da doğrudan bağlıdır.

3.1. Çin’de Elektrikli Araç Kullanımının Karbon Emisyonları Üzerine Etkileri

Çin’de elektrikli araçların karbon ayak izi, üretim aşamasında içten yanmalı motorlu araçlara kıyasla daha yüksektir; özellikle malzeme hazırlama ve pil üretimi, bataryalı elektrikli araçlarda üretim emisyonlarının %59’unu, plug-in hibrit elektrikli araçlarda ise %66’sını oluşturmaktadır [63]. Ancak kullanım aşamasında bataryalı elektrikli araçlar, benzinli araçlara göre ortalama %35 daha düşük emisyon üretir ve pil geri dönüşümü, özellikle doğrudan fiziksel yöntemlerle uygulandığında, karbon emisyonlarını önemli ölçüde azaltabilir [64,65,66]. Pil kimyası da yaşam döngüsü emisyonlarını etkiler: NMC ve LFP piller, içten yanmalı motorlu araçlara göre üretim aşamasında %59–60 daha fazla CO₂ yaymakla birlikte, kilometre başına emisyonları 40–84 g CO₂-eşdeğeri arasında değişmektedir [67,68,69]. Bölgesel güç karışımı, elektrikli araçların karbon ayak izi üzerinde belirleyici bir rol oynar; kömür ağırlıklı bölgelerde emisyonlar yüksek olabilirken, yenilenebilir enerji payı yüksek bölgelerde bataryalı elektrikli araçlar önemli ölçüde CO₂ azaltımı sağlar [70,71,72]. Ülke genelinde 2015–2020 yılları

arasında yaşam döngüsü emisyonları, elektrik üretimindeki karbon yoğunluğunun düşmesiyle 41 t CO₂-eşdeğerinden 34,1 t’ye gerilemiştir [73].

3.2. ABD’de Elektrikli Araç Kullanımının Karbon Emisyonları Üzerine Etkileri

Amerika Birleşik Devletleri’nde elektrikli araçların yaşam döngüsü karbon emisyonları, içten yanmalı motorlu araçlara kıyasla kullanım ve enerji üretim koşullarına bağlı olarak daha düşük seyretmektedir. 2018–2030 yılları arasında yapılan değerlendirmeler, plug-in hibrit elektrikli araçların içten yanmalı motorlu araçlara göre sera gazı emisyonlarını %38–41, hibrit elektrikli araçların ise %7–12 oranında azaltabildiğini göstermektedir [74,75]. Kullanılmış pillerden geri kazanılan değerli malzemelerin yeni pil üretiminde kullanılması, kaynak talebini azaltmakta ve özellikle pirometalurji ile geri kazanılan malzemeler sayesinde lityum iyon batarya üretimiyle ilişkili sera gazı emisyonlarını yaklaşık %23 oranında düşürebilmektedir [11,76]. ABD’de bölgesel güç karışımı da elektrikli araçların karbon ayak izi üzerinde belirleyici bir etkidir; marjinal ve ortalama şebeke emisyonları arasındaki fark nedeniyle, bazı eyaletlerde plug-in hibrit elektrikli araç ve bataryalı elektrikli araçlar arasındaki karbon emisyon farkı %50’ye kadar çıkabilmektedir [77]. Ortalama güç üretim karışımına göre elektrikli araçlar 24 eyalette en az karbon yoğun araçlar olarak kabul edilirken, gecikmeli şarj uygulamaları ve kömür ağırlıklı üretim durumlarında emisyonlar artabilmektedir [78]. Ayrıca, ortam sıcaklığı, pil

döngüsü ömrü ve kapasite kayıpları da elektrikli araçların km başına enerji tüketimi ve sera gazı emisyonlarını %11,5–16,2 artırabilmektedir; bozulmuş pillerin değiştirilmesi ise emisyonları daha da yükseltebilir [79,80,81].

3.3. Avrupa Birliği'nde Elektrikli Araç Kullanımının Karbon Emisyonları Üzerine Etkileri

Avrupa Birliği'nde elektrikli araçların karbon emisyonları, üretim aşamasında içten yanmalı motorlu araçlara göre daha yüksek olup 87–95 g CO₂-eq/km seviyesindedir; içten yanmalı motorlu araçlarda ise bu değer 43 g CO₂-eq/km'dir ve farkın %35–41'i pil üretiminden kaynaklanmaktadır [6]. Ortalama Avrupa elektrik karışımı kullanıldığında (%34 yenilenebilir, %25 nükleer), elektrikli araçların yaşam döngüsü emisyonu içten yanmalı motorlu araçların %58,6'sı seviyesindedir ve pil geri dönüşümü 1 kg pil başına 158 g CO₂-eq ek fayda sağlar [82,83]. Güç karışımı, elektrikli araçların karbon emisyonları üzerinde belirleyici bir etkidir. 150.000 km ömür varsayımıyla, ortalama Avrupa elektriğiyle çalışan elektrikli araçlar benzinli ve dizel içten yanmalı motorlu araçlara kıyasla %20–24 ve %10–14 oranında sera gazı azaltımı sağlayabilir. Doğal gaz kullanıldığında elektrikli araçların emisyonları benzinli içten yanmalı motorlu araçlara kıyasla %12 düşerken, kömürlü elektrik üretimi durumunda elektrikli araçlar daha yüksek emisyon yaratabilir [6]. Avrupa ülkeleri arasında elektrikli araçların karbon ayak izi, yerel güç karışımına göre büyük farklılıklar gösterir. Norveç'te (%97 yenilenebilir enerji) elektrikli araçların emisyonları içten yanmalı motorlu araçlara göre %33 daha düşüktür [84]. Almanya ve Hollanda'da yenilenebilir enerji payı artırılmadıkça elektrikli araçların avantajı sınırlıdır; Polonya'da kömür ağırlıklı üretim nedeniyle elektrikli araçların karbon emisyonu diğer AB ülkelerinden yüksektir [85,86,87]. Genel olarak, AB üye ülkelerinde yenilenebilir enerjiyle şarj edilen elektrikli araçların kullanımı sera gazlarını yaklaşık %60 oranında azaltabilir, ancak bazı ülkelerde altyapı iyileştirmeleri ve yenilenebilir enerji payının artırılması öncelikli olmaya devam etmektedir [88,89,90].

3.4. Elektrikli Araç Kullanımının Su Emisyonları Üzerine Etkileri

ABD'de artan nüfus ve enerji talebi, elektrik üretimi ile su kullanımı arasındaki karşılıklı bağımlılığı kritik bir çevresel sorun haline getirmiştir. Fosil yakıtlara dayalı enerji üretimi, yüksek karbon emisyonlarının yanı sıra yoğun su çekimi ve tüketimi nedeniyle ekolojik baskılar yaratmaktadır [91,92,93]. Özellikle kömür ve nükleer santraller, ülkedeki tatlı su çekimlerinin

büyük kısmından sorumlu olup, kömür bazlı elektrik üretimi toplam çekimin yaklaşık %50'sini oluşturmaktadır [94,95]. Elektrikli araçlar, karbon emisyonları açısından avantajlı olsa da, elektrik üretim kaynaklarına bağlı olarak bölgesel su ayak izi üzerinde doğrudan etkiler yaratmaktadır. Literatürde araç yaşam döngüsünde kullanım aşamasının enerji tüketiminin büyük çoğunluğunu (%76–85) oluşturduğu ve su ayak izi açısından da en kritik aşama olduğu vurgulanmaktadır [96]. Bu nedenle, elektrikli araçların WTW analizine dayalı su ayak izi değerlendirmeleri, sürdürülebilir ulaşım politikalarının geliştirilmesinde temel bir araç olarak görülmektedir [88,97].

Literatürde bataryalı elektrikli araçlar ve içten yanmalı motorlu araçların su ayak izi üzerine yapılan çalışmalar, bölgesel elektrik üretim profillerine bağlı olarak önemli farklılıklar ortaya koymaktadır. Ortalama elektrik üretim karışımına göre bataryalı elektrikli araçlar bazı eyaletlerde içten yanmalı motorlu araçlara kıyasla 0,14 galon/mil tasarruf sağlayabilirken, hidroelektrik ağırlıklı eyaletlerde su tüketimi içten yanmalı motorlu araçlardan daha yüksek olabilmektedir [98]. Güneş enerjisiyle şarj edilen bataryalı elektrikli araçlar tüm senaryolarda en düşük su tüketim ve çekim değerlerini göstermekte, içten yanmalı motorlu araçlara kıyasla 0,06–0,23 galon/mil arasında tasarruf sağlamaktadır. Marjinal elektrik karışımı senaryosunda (çoğunlukla doğal gaz ve kömür bazlı), bataryalı elektrikli araçlar bazı eyaletlerde su tasarrufu sağlarken, kömür oranı yüksek bölgelerde (ör. Illinois) içten yanmalı motorlu araçlara göre daha yüksek su tüketimine neden olabilmektedir. Yoğun nüfuslu eyaletlerde (Kaliforniya, New York, Teksas) ise bataryalı elektrikli araçlar hâlâ 0,04–0,10 galon/mil aralığında su tasarrufu sunmaktadır [99]. Bu bulgular, bataryalı elektrikli araçların su ayak izinin yalnızca araç teknolojisine değil, aynı zamanda bölgesel elektrik üretim profillerine de güçlü biçimde bağlı olduğunu göstermektedir [100]. Örneğin, alternatif araçlar güneş enerjisiyle şarj edilmediklerinde içten yanmalı motorlu araçlara kıyasla su tüketimini artırabilir; en kötü durumda Idaho'da BEV kullanımı 70 kat fazla su tüketimine yol açabilir. Buna karşın, %100 güneş enerjisiyle şarj edilen bataryalı elektrikli araçlar %97'ye kadar su tasarrufu sağlayabilir [99].

Tablo 2, Çin, Amerika Birleşik Devletleri ve Avrupa Birliği'nde elektrikli araçların üretim ve kullanım aşamalarındaki karbon ve su etkilerini, elektrik üretim kaynakları ve batarya geri dönüşümünün rolü ile özetlemektedir.

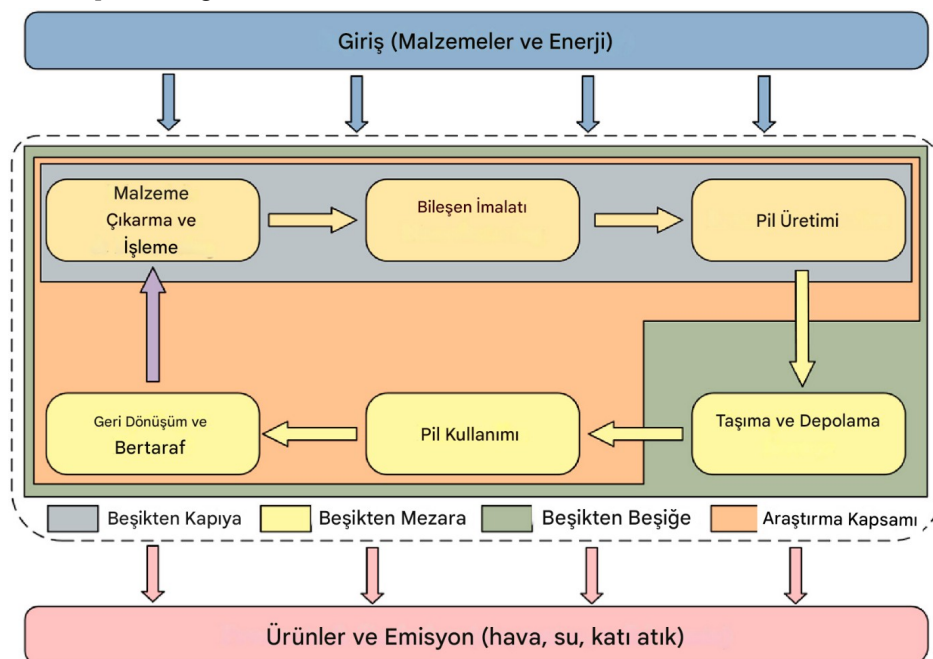
Tablo 2. Elektrikli Araçların Karbon ve Su Etkilerinin Ülke Bazlı Karşılaştırması

Ülke / Bölge	Üretim Aşaması	Kullanım Aşaması	Güç Kaynağı Etkisi	Geri Dönüşüm / Su Etkisi
Çin	Batarya üretimi yüksek karbon salımı oluşturur (%59–66)	Tamamen elektrikli araçlar, benzinli araçlara göre %35 daha az emisyon üretir	Kömür yoğun bölgelerde emisyon yüksek, yenilenebilir enerji ile düşer	Pil geri dönüşümü karbonu azaltır
Amerika Birleşik Devletleri	Batarya üretimi enerji ve hammadde tüketimi açısından yüksektir	Hibrit araçlar %7–12, şarj edilebilir hibritler %38–41 emisyon azaltır	Bazı eyaletlerde kömür nedeniyle emisyonlar artabilir, yenilenebilir enerji ile azalır	Geri dönüşüm %23 azaltım sağlar; güneş enerjisi ile su tasarrufu mümkün
Avrupa Birliği	Elektrikli araç üretimi içten yanmalı araçlara göre yüksektir (87–95 g/km vs 43 g/km)	Yaşam döngüsü emisyonları içten yanmalı araçların %58,6'sına denk gelir	Yenilenebilir enerji payı yüksek ülkelerde avantajlı, kömür ağırlıklı ülkelerde dezavantajlı	Pil geri dönüşümü ek fayda sağlar; su ve karbon ayak izi azalır

4. Elektrikli Araç Bataryalarının Geri Dönüşüm Süreci ve Çevresel Etkileri

Lityum-iyon bataryaların yaşam döngüsü değerlendirmesi (LCA), hammadde çıkarımından bertarafa kadar tüm aşamaları kapsayacak şekilde "beşikten mezara" yaklaşımıyla ele alınmalıdır. Ancak mevcut çalışmaların önemli bir kısmı yalnızca üretim sürecine, yani "beşikten kapıya" sistem sınırına odaklanmaktadır [43]. Son yıllarda ise, kullanım ömrünü tamamlayan bataryaların artışıyla birlikte, geri dönüşüm yöntemlerinin çevresel etkilerine yönelik araştırmalar hız kazanmıştır [101,102,103]. Buna rağmen,

bataryaların "beşikten beşiğe" yani geri dönüşüm ve yeniden üretim süreçlerini içeren kapsamlı karbon ayak izi analizlerinin oldukça sınırlı olduğu görülmektedir. Bu nedenle, kapalı döngü yaklaşımlarının geliştirilmesi, enerji ve kaynak kullanımının optimize edilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Şekil 3'te görüldüğü gibi pillerin taşınması ve depolanması aşamasındaki karbon ayak izinin karmaşıklığı nedeniyle genellikle çalışmaların kapsamı dışında tutulduğu gösterilmektedir [53].



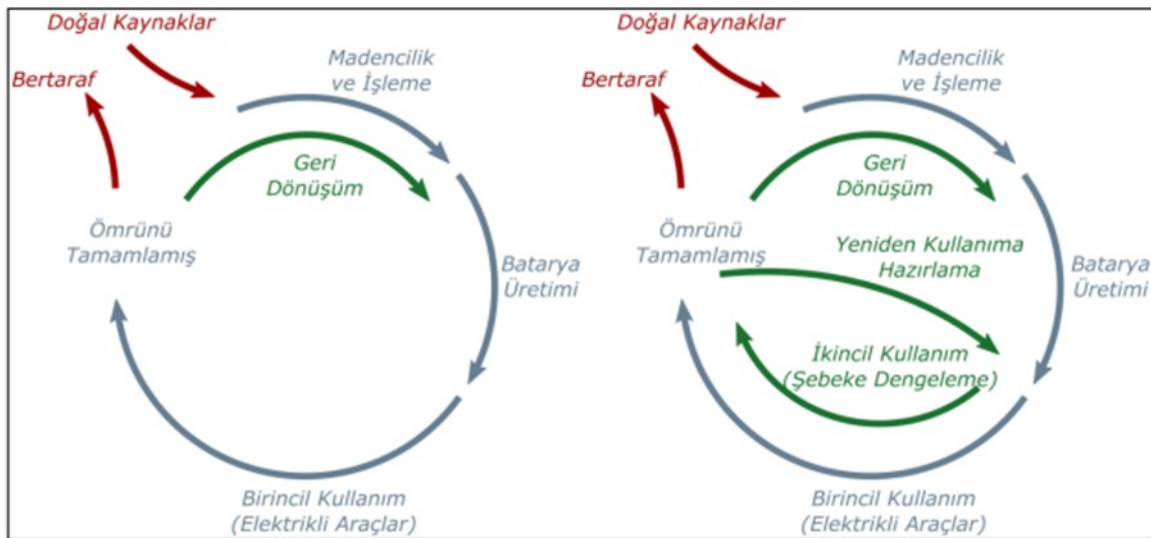
Şekil 3. Pilin tam yaşam döngüsündeki sistem sınırı [53].

Geri dönüşüm aşamasında farklı teknolojik yollar öne çıkmaktadır. Günümüzde başlıca dört yöntem kullanılmaktadır: pirometalurji, hidrometalurji, piro-hidrometalurji kombinasyonu ve doğrudan fiziksel geri dönüşüm [104,105]. Pirometalurjik yöntemde, atık LIB'ler yüksek sıcaklıkta eritilerek nikel, kobalt ve bakır alaşımlarına dönüştürülürken; lityum ve alüminyum cüruf halinde uzaklaştırılmaktadır [106]. Hidrometalurjik yöntem ise düşük enerji tüketimi, yüksek geri kazanım verimi ve olgunlaşmış süreçleriyle öne çıkmakta, özellikle Çin'de yaygın olarak tercih edilmektedir [53]. Bununla birlikte, asit liçi sırasında kullanılan güçlü reaktifler ikincil çevresel kirlilik yaratabilmektedir. Doğrudan fiziksel geri dönüşümde ise, atık piller mekanik yollarla parçalanmakta ve fiziksel özelliklere göre ayrıştırılarak katot, anot ve kolektör malzemeleri yeniden kullanılabilir hale getirilmektedir [107]. Bu yöntem, geri kazanılan aktif malzemelerin doğrudan yeni batarya üretiminde kullanılmasına olanak tanıyarak enerji ve kaynak tüketimini azaltma potansiyeli taşımaktadır.

Chen ve arkadaşları [53] çalışmalarında, lityum-iyon bataryaların (LIB) geri dönüşüm ve yeniden üretim süreçlerini yaşam döngüsü değerlendirmesi (LCA) kapsamında incelemiş ve pirometalurji, hidrometalurji ile doğrudan fiziksel geri dönüşüm yöntemlerinin karbon emisyonları karşılaştırılmıştır. Sonuçlara göre pirometalurji, yüksek sıcaklık gerektirmesi ve grafit pirolizinden kaynaklanan ek salımlar nedeniyle 5,11 kg CO₂-eq/kWh ile en yüksek emisyonu üretmektedir. Hidrometalurji ise 2,68 kg CO₂-eq/kWh değerle pirometalurjiden %47,6 daha düşük emisyon sağlamakta; ancak çok sayıda kimyasal işlem adımı toksik gaz ve atık çözelti oluşumuna yol açmaktadır [108]. Doğrudan fiziksel geri dönüşüm ise 3,65 kg CO₂-eq/kWh ile ara bir değer sunmakta, fakat geri kazanılan malzemelerin doğrudan batarya

üretiminde kullanılabilmesi sayesinde ek üretim adımları ve ikincil kirlenme azaltılmaktadır. Geri dönüştürülmüş malzemelerle üretilen bataryalar karşılaştırıldığında, pirometalurjik süreç yalnızca %4,8'lik bir emisyon azalımı sağlarken, hidrometalurji %33,5 oranında düşüş göstermektedir. En yüksek azaltım ise doğrudan fiziksel geri dönüşümde gözlemlenmiş, bu yöntem hammadde tabanlı üretime kıyasla %51,8 daha düşük emisyon değeri ile öne çıkmıştır. Ancak, doğrudan fiziksel geri dönüşüm teknolojisi henüz küçük ölçekli deneylerle sınırlıdır, büyük ölçekli uygulamalar için daha verimli ve olgun süreçlerin geliştirilmesini gerekli kılmaktadır.

Elektrikli araçlarda kullanılan bataryaların ömrü genellikle 8–10 yıl olarak kabul edilmekte, araçların toplam kullanım ömrü ise yaklaşık 15 yıl veya 200.000 km olarak belirtilmektedir [109,110,111]. Bataryaların performansı, aşırı şarj edilmesi, tamamen boşaltılması, hızlı şarj ve yüksek sıcaklık gibi koşullardan etkilenmektedir [112]. Ömrünü tamamlamış bataryaların geri dönüşümü ve yeniden kullanımı, içerdiği değerli metallerin yeniden ekonomiye kazandırılması açısından önemli olup hem çevresel hem de ekonomik katkı sağlar (Şekil 4) [113]. Kapasitesinin %80'ine kadar kalan bataryaların ikincil uygulamalarda yeniden değerlendirilmesi, atık miktarını azaltırken kalan enerjiyi kullanma imkânı sunarak çevresel ve ekonomik avantajlar sağlar [110]. Ayrıca, sınırlı sayıda çalışmada, bataryaların yeniden kullanımı toplam kullanım süresini uzatarak CO₂ ve sera gazı emisyonlarını azaltmaktadır; örneğin, ömrü tükenmiş bataryaların yeniden kullanımının CO₂ emisyonunda %56 azalma sağladığı bildirilmiştir [109,112]. Bu bağlamda, atık yönetiminde benimsenen 4R yaklaşımı (reduce, reuse, recycle, recovery), ömrünü tamamlamış bataryaların yeniden kullanımı, geri dönüşümü ve geri kazanımı yoluyla doğal kaynakların korunmasını ve atık



Şekil 4. Kullanım sonrası doğrudan bertaraf ve yeniden kullanım akış şeması [112].

yönetiminin etkin biçimde uygulanmasını hedeflemektedir [55].

Atık yönetiminde ilk adım, atıkların oluşumunun önlenmesidir. Elektrikli araçlar bağlamında bu, batarya sayısının azaltılmasıyla ilişkilidir. Ancak artan elektrikli araç sayısı ve bataryaların uzun şarj süreleri, dolu bataryalarla değiştirilme uygulamasını zorunlu kılmakta, bu da araç başına birden fazla bataryanın kullanımını gerektirmektedir. Sonuç olarak, bataryaların üretimi ve kullanım ömrünü tamamlaması sırasında yüksek miktarda kimyasal madde çevreye salınabilmektedir. Özellikle nikel ve kadmiyum gibi toksik içeriklere sahip bataryalar, uygun bertaraf veya geri dönüşüm yöntemleri uygulanmadığında çevreye ciddi zarar verebilir [58,114].

Ömrünü tamamlamış elektrikli araç bataryaları, orijinal kapasitesinin %70-80'ini koruyabilmektedir [110]. Bu durum, bataryaların araçlarda kullanımının sona ermesinden sonra şebeke dengeleme, yedek güç sağlama veya enerji depolama gibi ikincil uygulamalarda değerlendirilebileceğini göstermektedir [115,116]. Yenilenebilir enerji sistemleri ile desteklenen binalarda bataryaların yeniden kullanımı çevresel avantaj sağlayabilmekle birlikte, kullanılan elektrik enerjisinin kaynağına bağlı olarak toplam çevresel etkide değişiklikler gözlemlenmektedir [109].

Elektrikli araç bataryalarının tipik bertaraf yöntemi geri dönüşümdür. Pb-asit, Ni-Cd, NiMH ve Li-ion bataryaların geri dönüşüm yöntemleri farklılık göstermektedir. Pb-asit bataryalarda kurşun yüksek oranda (%98) geri kazanılırken, sülfürik asit nötralize edilerek endüstride kullanılmaktadır [55,117]. Ni-Cd ve NiMH bataryalar tamamen geri dönüştürülebilmektedir, ancak Li-ion bataryaların geri dönüşümü üretim sürecine göre daha fazla enerji gerektirmektedir [75,118]. Japonya'da yapılan çalışmalar, Li-ion bataryalardan lityumun %56-61 oranında yeniden kullanılabilirliğini göstermektedir [111]. Ancak geri dönüşüm maliyetleri, tüm süreçlerin çevresel olarak avantajlı olmasını sınırlayabilmektedir [119].

Bataryaların geri kazanımı, değerli materyallerin tekrar üretime kazandırılması amacıyla uygulanmaktadır. Pirometalurji ve hidrometalurji yöntemleriyle kobalt, nikel ve manganez gibi elementler geri kazanılabilmektedir [120]. Lityum ve diğer eser elementler termal işlemlerle cüfur haline getirilmekte veya liçleme yöntemleriyle geri kazanılabilmektedir [121,114]. Kurşun asit bataryalarda kurşunun geri kazanımı, çevresel kirliliğin azaltılmasına katkı sağlamaktadır [122].

Batarya bertarafı, yüksek voltaj ve içerdikleri kimyasallar nedeniyle tehlikeli bir süreçtir [112].

AB atık pil direktifi, bataryaların çevreye zarar vermeyecek şekilde bertaraf edilmesini öngörmektedir. Li-ion bataryaların büyük kısmı geri dönüşüm potansiyeline sahip olmasına rağmen, %95'i hâlen düzenli depolama alanlarına gönderilmektedir [123]. Doğrudan bertaraf, geri kazanıma uygun olmayan materyaller için tercih edilmelidir [124]. Türkiye'de elektrikli araç bataryaları için özel bir yasal düzenleme bulunmamakla birlikte, tehlikeli içerikli pillerin yönetimi mevcut yönetmelikler kapsamında değerlendirilmektedir [55].

5. Sonuç

Sonuç olarak, elektrikli araç bataryaları sürdürülebilir ulaşımın ve enerji dönüşümünün temel bileşenlerinden biridir. Üretim aşamasında yüksek enerji tüketimi, değerli metal kullanımı ve su kaynakları üzerindeki baskı nedeniyle karbon ve su ayak izine önemli katkı sağlasa da, kullanım aşamasındaki fosil yakıt tasarrufu ve yerel hava kalitesine sağladığı faydalar çevresel maliyetleri kısmen dengelemektedir. Elektrikli araçların çevresel avantajları, büyük ölçüde elektrik şebekesinin yenilenebilir enerji oranına bağlıdır; yenilenebilir enerji payı yüksek şebekelerde karbon ayak izi önemli ölçüde azalırken, fosil yakıt temelli sistemlerde sınırlı kalmaktadır. Mevcut lityum-iyon bataryalar yüksek enerji yoğunluğu ve güvenilirlik sunarken, sodyum-iyon ve katı hâl bataryalar gibi yeni nesil teknolojiler daha düşük su tüketimi, uzun ömür ve azaltılmış karbon ayak izi ile gelecek için umut vaat etmektedir. Ayrıca, bataryaların geri dönüşümü ve etkin bertarafı, değerli hammaddelerin yeniden kazanılmasını sağlayarak çevresel etkileri azaltmakta kritik rol oynamaktadır. Gelecekte, çevresel etkisi düşük batarya teknolojilerinin geliştirilmesi, yenilenebilir enerji kullanımının artırılması ve geri dönüşüm altyapısının iyileştirilmesi, elektrikli araçların sürdürülebilir ulaşım ve düşük karbonlu gelecek hedeflerine katkısı güçlendirecektir.

6. Referanslar

- [1] N. Golledge, E. Keller, N. Gomez, K. Naughten, J. Bernales, L. Trusel, T. Edwards, "Global environmental consequences of twenty-first-century ice-sheet melt", *Nature*, 2019, 566(7742), 65–72.
- [2] K. Tanaka, O. Boucher, P. Ciais, D. Johansson, J. Morfeldt, "Cost-effective implementation of the Paris Agreement using flexible greenhouse gas metrics", *Science Advances*, 2021, 7(22), eab9020.
- [3] A. Elgowainy, J. Han, J. Ward, F. Joseck, D. Gohlke, A. Lindauer, T. Wallington, "Current and future United States light-duty vehicle pathways: cradle-to-grave lifecycle greenhouse gas emissions

and economic assessment”, *Environmental Science & Technology*, 2018, 52(4), 2392-2399.

- [4] L. Lander, E. Kallitsis, A. Hales, J. Edge, A. Korre, G. Offer, “Cost and carbon footprint reduction of electric vehicle lithium-ion batteries through efficient thermal management”, *Applied Energy*, 2021, 289, 116737.
- [5] S. Verma, G. Dwivedi, P. Verma, “Life cycle assessment of electric vehicles in comparison to combustion engine vehicles: A review”, *Materials Today: Proceedings*, 2022, 49, 217-222.
- [6] T. Hawkins, B. Singh, G. Majeau-Bettez, A. Strømman, “Comparative environmental life cycle assessment of conventional and electric vehicles”, *Journal of Industrial Ecology*, 2013, 17(1), 53-64.
- [7] G. Harper, R. Sommerville, E. Kendrick, L. Driscoll, P. Slater, R. Stolkin, P. Anderson, “Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles”, *Nature*, 2019, 575(7781), 75-86.
- [8] X. Lai, Q. Chen, X. Tang, Y. Zhou, F. Gao, Y. Guo, Y. Zheng, “Critical review of life cycle assessment of lithium-ion batteries for electric vehicles: A lifespan perspective”, *Etransportation*, 2022, 12, 100169.
- [9] C. Yuan, H. Cao, K. Shen, Y. Deng, D. Zeng, Y. Dong, M. Hauschild, “Water-based manufacturing of lithium ion battery for life cycle impact mitigation”, *CIRP Annals*, 2021, 70(1), 25-28.
- [10] I. Dolganova, A. Rödl, V. Bach, M. Kaltschmitt, M. Finkbeiner, “A review of life cycle assessment studies of electric vehicles with a focus on resource use”, *Resources*, 2020, 9(3), 32.
- [11] X. Xia, P. Li, “A review of the life cycle assessment of electric vehicles: Considering the influence of batteries”, *Science of the Total Environment*, 2022, 814, 152870.
- [12] Y. Ding, Z. Cano, A. Yu, J. Lu, Z. Chen, “Automotive Li-ion batteries: current status and future perspectives”, *Electrochemical Energy Reviews*, 2019, 2(1), 1-28.
- [13] R. Nealer, “Cleaner cars from cradle to grave: How electric cars beat gasoline cars on lifetime global warming emissions”, *JSTOR Sustainability Collection*, 2022.
- [14] P. Alotto, M. Guarnieri, F. Moro, “Redox flow batteries for the storage of renewable energy: A review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 29, 325-335.
- [15] K. Shah, F. Kaka, “Reduction of carbon footprint of electric vehicles by using battery alternatives and integrated photovoltaics”, *Materials Today: Proceedings*, 2022, 57, 106-111.
- [16] D. Wang, N. Zamel, K. Jiao, Y. Zhou, S. Yu, Q. Du, Y. Yin, “Life cycle analysis of internal combustion engine, electric and fuel cell vehicles for China”, *Energy*, 2013, 59, 402-412.
- [17] E. Helmers, M. Weiss, “Pil elektrikli otomobillerin yaşam döngüsü değerlendirmesindeki gelişmeler ve kritik yönler”, *Enerji ve Emisyon Kontrol Teknolojileri*, 2017, 1-18.
- [18] H. Kim, S. Lee, T. Wallington, “Cradle-to-gate and use-phase carbon footprint of a commercial plug-in hybrid electric vehicle lithium-ion battery”, *Environmental Science & Technology*, 2023, 57(32), 11834-11842.
- [19] F. Arshad, J. Lin, N. Manurkar, E. Fan, A. Ahmad, M. Tariq, L. Li, “Life cycle assessment of lithium-ion batteries: a critical review”, *Resources, Conservation and Recycling*, 2022, 180, 106164.
- [20] A. Elgowainy, J. Han, J. Ward, F. Joseck, D. Gohlke, A. Lindauer, T. Wallington, “Cradle-to-grave lifecycle analysis of US light duty vehicle-fuel pathways: a greenhouse gas emissions and economic assessment of current (2015) and future (2025-2030) technologies”, *Argonne National Lab.*, 2016, No. ANL/ESD-16/7.
- [21] A. Aichberger, G. Jungmeier, “Environmental life cycle impacts of automotive batteries based on a literature review”, *Energies*, 2020, 13(23), 6345.
- [22] H. Abdel-Shafy, R. Aly, “Water issue in Egypt: Resources, pollution and protection endeavors”, *Central European Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 2002, 8(1), 3-21.
- [23] M. Mekonnen, A. Hoekstra, “Four billion people facing severe water scarcity”, *Science Advances*, 2016, 2(2), e1500323.
- [24] P. Green, C. Vörösmarty, I. Harrison, T. Farrell, L. Sáenz, B. Fekete, “Freshwater ecosystem services supporting humans: Pivoting from water crisis to water solutions”, *Global Environmental Change*, 2015, 34, 108-118.
- [25] M. Song, R. Wang, X. Zeng, “Water resources utilization efficiency and influence factors under environmental restrictions”, *Journal of Cleaner Production*, 2018, 184, 611-621.
- [26] M. Shafique, A. Azam, M. Rafiq, X. Luo, “Life cycle assessment of electric vehicles and internal combustion engine vehicles: A case study of Hong Kong”, *Research in Transportation Economics*, 2022, 91, 101112.
- [27] M. Shahzad, M. Burhan, L. Ang, K. Ng, “Energy-water-environment nexus underpinning future desalination sustainability”, *Desalination*, 2017, 413, 52-64.
- [28] S. Nair, W. Timms, “Freshwater footprint of fossil fuel production and thermal electricity

generation and water stresses across the National Electricity Market (NEM) region of Australia”, *Journal of Cleaner Production*, 2020, 267, 122085.

[29] L. Wang, W. Shen, H. Kim, T. Wallington, Q. Zhang, W. Han, “Life cycle water use of gasoline and electric light-duty vehicles in China”, *Resources, Conservation and Recycling*, 2020, 154, 104628.

[30] M. Berger, J. Warsen, S. Krinke, V. Bach, M. Finkbeiner, “Water footprint of European cars: potential impacts of water consumption along automobile life cycles”, *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(7), 4091-4099.

[31] A. Rispoli, G. Iaquaniello, A. Salladini, N. Verdone, M. Pepe, A. Borgogna, G. Vilardi, “Simultaneous decarbonisation of steel and Oil&Gas industry by MSW gasification: Economic and environmental analysis”, *Energy Conversion and Management*, 2021, 245, 114577.

[32] J. Guilera, M. Filipe, A. Montesó, I. Mallol, T. Andreu, “Carbon footprint of synthetic natural gas through biogas catalytic methanation”, *Journal of Cleaner Production*, 2021, 287, 125020.

[33] M. Murmura, G. Vilardi, “Energy and exergy analysis of the zinc/zinc oxide thermochemical cycle for hydrogen production and fuel cell power generation”, *Energy Conversion and Management*, 2021, 247, 114761.

[34] C. Li, M. Negnevitsky, X. Wang, W. Yue, X. Zou, “Multi-criteria analysis of policies for implementing clean energy vehicles in China”, *Energy Policy*, 2019, 129, 826-840.

[35] A. C. Schomberg, S. Bringezu, M. Flörke, “Extended life cycle assessment reveals the spatially-explicit water scarcity footprint of a lithium-ion battery storage”, *Communications Earth & Environment*, 2021, 2(1), s.11.

[36] M. Clemente, P. Maharjan, M. Salazar, T. Hofman, “Meta-analysis of Life Cycle Assessments for Li-Ion Batteries Production Emissions”, *arXiv preprint arXiv:2506.05531*, 2025.

[37] J. B. Dunn, L. Gaines, J. C. Kelly, C. James, K. G. Gallagher, “The significance of Li-ion batteries in electric vehicle life-cycle energy and emissions and recycling's role in its reduction”, *Energy & Environmental Science*, 2015, 8(1), s.158-168.

[38] L. A. W. Ellingsen, G. Majeau-Bettez, B. Singh, A. K. Srivastava, L. O. Valøen, A. H. Strømman, “Life cycle assessment of a lithium-ion battery vehicle pack”, *Journal of Industrial Ecology*, 2014, 18(1), s.113-124.

[39] V. Flexer, C. F. Baspineiro, C. I. Galli, “Lithium recovery from brines: A vital raw material for green energies with a potential environmental

impact in its mining and processing”, *Science of the Total Environment*, 2018, 639, s.1188-1204.

[40] J. Sadhukhan, M. Christensen, “An in-depth life cycle assessment (LCA) of lithium-ion battery for climate impact mitigation strategies”, *Energies*, 2021, 14(17), s.5555.

[41] D. Yao, Y. Liu, Z. Xu, Z. Zhu, J. Qi, Y. Wang, P. Cui, “Comparative water footprint assessment of fuel cell electric vehicles and compressed natural gas vehicles”, *Science of the Total Environment*, 2022, 830, s.154820.

[42] Wikipedia contributors, “Electric Vehicle Battery”, *Wikipedia, Wikimedia Foundation*, 2025. Erişim tarihi: 18 Eylül 2025, https://en.wikipedia.org/wiki/Electric_vehicle_battery.

[43] H. C. Kim, T. J. Wallington, R. Arsenault, C. Bae, S. Ahn, J. Lee, “Cradle-to-gate emissions from a commercial electric vehicle Li-ion battery: a comparative analysis”, *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(14), s.7715-7722.

[44] H. Hao, Z. Mu, S. Jiang, Z. Liu, F. Zhao, “GHG emissions from the production of lithium-ion batteries for electric vehicles in China”, *Sustainability*, 2017, 9(4), s.504.

[45] Q. Dai, J. C. Kelly, L. Gaines, M. Wang, “Life cycle analysis of lithium-ion batteries for automotive applications”, *Batteries*, 2019, 5(2), s.48.

[46] P. Li, X. Xia, J. Guo, “A review of the life cycle carbon footprint of electric vehicle batteries”, *Separation and Purification Technology*, 2022, 296, s.121389.

[47] L. Gaines, J. Sullivan, A. Burnham, I. Belharouak, “Life-cycle analysis of production and recycling of lithium ion batteries”, *Transportation Research Record*, 2011, 2252(1), s.57-65.

[48] N. Nitta, F. Wu, J. T. Lee, G. Yushin, “Li-ion battery materials: present and future”, *Materials Today*, 2015, 18(5), s.252-264.

[49] D. A. Notter, M. Gauch, R. Widmer, P. Wager, A. Stamp, R. Zah, H. J. Althaus, “Contribution of Li-ion batteries to the environmental impact of electric vehicles”, 2010.

[50] L. A. W. Ellingsen, B. Singh, A. H. Strømman, “The size and range effect: lifecycle greenhouse gas emissions of electric vehicles”, *Environmental Research Letters*, 2016, 11(5), s.054010.

[51] S. Hu, S. He, X. Jiang, M. Wu, P. Wang, L. Li, “Forecast and suggestions on the demand of lithium, cobalt, nickel and manganese resources in China's new energy automobile industry”, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, 769(4), s.042018.

[52] J. C. Kelly, M. Wang, Q. Dai, O. Winjobi, “Energy, greenhouse gas, and water life cycle analysis of lithium carbonate and lithium hydroxide

monohydrate from brine and ore resources and their use in lithium ion battery cathodes and lithium ion batteries”, *Resources, Conservation and Recycling*, 2021, 174, s.105762.

[53] Q. Chen, X. Lai, H. Gu, X. Tang, F. Gao, X. Han, Y. Zheng, “Investigating carbon footprint and carbon reduction potential using a cradle-to-cradle LCA approach on lithium-ion batteries for electric vehicles in China”, *Journal of Cleaner Production*, 2022, 369, s.133342.

[54] G. Pistoia, “Electric and hybrid vehicles: Power sources, models, sustainability, infrastructure and the market”, Elsevier, 2010.

[55] E. C. Güven, K. Gedik, “Ömrünü tamamlamış elektrikli araç bataryalarının çevresel yönetimi”, *Journal of the Institute of Science and Technology*, 2019, 9(2), s.726-737.

[56] S. K. Shahi, G. G. Wang, “Plug-In Hybrid Electric Vehicle Battery Selection for Optimum Economic and Environmental Benefits Using Pareto Set Points and PSAT™”, In *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, 2010, 44090, s.701-713.

[57] J. Garche, E. Karden, P. T. Moseley, D. A. Rand, “Lead-acid batteries for future automobiles”, Elsevier, 2017.

[58] A. Kerem, “Elektrikli araç teknolojisinin gelişimi ve gelecek beklentileri”, *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 2014, 5(1), s.1-13.

[59] A. Machín, M. C. Cotto, F. Díaz, J. Duconge, C. Morant, F. Márquez, “Environmental aspects and recycling of solid-state batteries: a comprehensive review”, *Batteries*, 2024, 10(7), s.255.

[60] S. Sangsinsorn, S. Dsoke, O. Cojocar-Mirédin, “Opinion on sustainability-performance relationship: Na-ion batteries versus Li-ion batteries”, *arXiv preprint arXiv:2411.10095*, 2024.

[61] J. M. Tarascon, “Key challenges in future Li-battery research”, *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2010, 368(1923), s.3227-3241.

[62] L. Wang, J. Hu, Y. Yu, K. Huang, Y. Hu, “Lithium-air, lithium-sulfur, and sodium-ion, which secondary battery category is more environmentally friendly and promising based on footprint family indicators?”, *Journal of Cleaner Production*, 2020, 276, s.124244.

[63] L. Yang, B. Yu, B. Yang, H. Chen, G. Malima, Y. M. Wei, “Life cycle environmental assessment of electric and internal combustion engine vehicles in China”, *Journal of Cleaner Production*, 2021, 285, 124899.

[64] Y. Zheng, X. He, H. Wang, M. Wang, S. Zhang, D. Ma, Y. Wu, “Well-to-wheels greenhouse

gas and air pollutant emissions from battery electric vehicles in China”, *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2020, 25(3), 355-370.

[65] H. Hao, Q. Qiao, Z. Liu, F. Zhao, “Impact of recycling on energy consumption and greenhouse gas emissions from electric vehicle production: The China 2025 case”, *Resources, Conservation and Recycling*, 2017, 122, 114-125.

[66] M. Yu, B. Bai, S. Xiong, X. Liao, “Evaluating environmental impacts and economic performance of remanufacturing electric vehicle lithium-ion batteries”, *Journal of Cleaner Production*, 2021, 321, 128935.

[67] S. Xiong, J. Ji, X. Ma, “Comparative life cycle energy and GHG emission analysis for BEVs and PHEVs: A case study in China”, *Energies*, 2019, 12(5), 834.

[68] P. Marques, R. Garcia, L. Kulay, F. Freire, “Comparative life cycle assessment of lithium-ion batteries for electric vehicles addressing capacity fade”, *Journal of Cleaner Production*, 2019, 229, 787-794.

[69] Q. Qiao, F. Zhao, Z. Liu, S. Jiang, H. Hao, “Comparative study on life cycle CO₂ emissions from the production of electric and conventional vehicles in China”, *Energy Procedia*, 2017, 105, 3584-3595.

[70] X. Ou, X. Yan, X. Zhang, “Using coal for transportation in China: Life cycle GHG of coal-based fuel and electric vehicle, and policy implications”, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2010, 4(5), 878-887.

[71] Y. Wu, Z. Yang, B. Lin, H. Liu, R. Wang, B. Zhou, J. Hao, “Energy consumption and CO₂ emission impacts of vehicle electrification in three developed regions of China”, *Energy Policy*, 2012, 48, 537-550.

[72] Z. Wu, C. Wang, P. Wolfram, Y. Zhang, X. Sun, E. Hertwich, “Assessing electric vehicle policy with region-specific carbon footprints”, *Applied Energy*, 2019, 256, 113923.

[73] Q. Qiao, F. Zhao, Z. Liu, X. He, H. Hao, “Life cycle greenhouse gas emissions of Electric Vehicles in China: Combining the vehicle cycle and fuel cycle”, *Energy*, 2019, 177, 222-233.

[74] R. Challa, D. Kamath, A. Anctil, “Well-to-wheel greenhouse gas emissions of electric versus combustion vehicles from 2018 to 2030 in the US”, *Journal of Environmental Management*, 2022, 308, 114592.

[75] C. Samaras, K. Meisterling, “Life cycle assessment of greenhouse gas emissions from plug-in hybrid vehicles: implications for policy”, 2008.

[76] T. P. Hendrickson, O. Kavvada, N. Shah, R. Sathre, C. D. Scown, “Life-cycle implications and supply chain logistics of electric vehicle battery

recycling in California”, *Environmental Research Letters*, 2015, 10(1), 014011.

- [77] M. A. M. Tamayao, J. J. Michalek, C. Hendrickson, I. M. Azevedo, “Regional variability and uncertainty of electric vehicle life cycle CO₂ emissions across the United States”, *Environmental Science & Technology*, 2015, 49(14), 8844-8855.
- [78] N. C. Onat, M. Kucukvar, O. Tatari, “Conventional, hybrid, plug-in hybrid or electric vehicles? State-based comparative carbon and energy footprint analysis in the United States”, *Applied Energy*, 2015, 150, 36-49.
- [79] J. Archsmith, A. Kendall, D. Rapson, “From cradle to junkyard: assessing the life cycle greenhouse gas benefits of electric vehicles”, *Research in Transportation Economics*, 2015, 52, 72-90.
- [80] H. Ambrose, A. Kendall, “Effects of battery chemistry and performance on the life cycle greenhouse gas intensity of electric mobility”, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2016, 47, 182-194.
- [81] F. Yang, Y. Xie, Y. Deng, C. Yuan, “Predictive modeling of battery degradation and greenhouse gas emissions from US state-level electric vehicle operation”, *Nature Communications*, 2018, 9(1), 2429.
- [82] C. Tagliaferri, S. Evangelisti, F. Acconcia, T. Domenech, P. Ekins, D. Barletta, P. Lettieri, “Life cycle assessment of future electric and hybrid vehicles: A cradle-to-grave systems engineering approach”, *Chemical Engineering Research and Design*, 2016, 112, 298-309.
- [83] L. Kurz, M. Faryadras, I. Klugius, F. Reichert, A. Scheibe, M. Schmidt, R. Wörner, “Global warming potential of a new waterjet-based recycling process for cathode materials of lithium-ion batteries”, *Batteries*, 2021, 7(2), 29.
- [84] E. Pipitone, S. Caltabellotta, L. Occhipinti, “A life cycle environmental impact comparison between traditional, hybrid, and electric vehicles in the European context”, *Sustainability*, 2021, 13(19), 10992.
- [85] O. Kanz, A. Reinders, J. May, K. Ding, “Environmental impacts of integrated photovoltaic modules in light utility electric vehicles”, *Energies*, 2020, 13(19), 5120.
- [86] O. Van Vliet, A. S. Brouwer, T. Kuramochi, M. van Den Broek, A. Faaij, “Energy use, cost and CO₂ emissions of electric cars”, *Journal of Power Sources*, 2011, 196(4), 2298-2310.
- [87] D. Burchart-Korol, S. Jursova, P. Folega, J. Korol, P. Pustejovska, A. Blaut, “Environmental life cycle assessment of electric vehicles in Poland and the Czech Republic”, *Journal of Cleaner Production*, 2018, 202, 476-487.
- [88] A. Moro, L. Lonza, “Electricity carbon intensity in European Member States: Impacts on GHG emissions of electric vehicles”, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2018, 64, 5-14.
- [89] L. C. Casals, E. Martinez-Laserna, B. A. García, N. Nieto, “Sustainability analysis of the electric vehicle use in Europe for CO₂ emissions reduction”, *Journal of Cleaner Production*, 2016, 127, 425-437.
- [90] X. Xia, P. Li, Z. Xia, R. Wu, Y. Cheng, “Life cycle carbon footprint of electric vehicles in different countries: A review”, *Separation and Purification Technology*, 2022, 301, 122063.
- [91] M. D. Bartos, M. V. Chester, “The conservation nexus: valuing interdependent water and energy savings in Arizona”, *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(4), 2139-2149.
- [92] C. W. King, M. E. Webber, “Water intensity of transportation”, 2008.
- [93] A. S. Stillwell, C. W. King, M. E. Webber, I. J. Duncan, A. Hardberger, “The energy-water nexus in Texas”, *Ecology and Society*, 2011, 16(1).
- [94] V. Fthenakis, H. C. Kim, “Life-cycle uses of water in US electricity generation”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010, 14(7), 2039-2048.
- [95] M. Q. Wang, S. Plotkin, D. J. Santini, J. He, L. Gaines, P. Patterson, “Total energy-cycle energy and emissions impacts of hybrid electric vehicles”, Argonne National Lab., 1997, No. ANL/ES/CP-94277; CONF-971212-.
- [96] N. C. Onat, M. Kucukvar, O. Tatari, “Scope-based carbon footprint analysis of US residential and commercial buildings: An input-output hybrid life cycle assessment approach”, *Building and Environment*, 2014, 72, 53-62.
- [97] A. Moro, E. Helmers, “A new hybrid method for reducing the gap between WTW and LCA in the carbon footprint assessment of electric vehicles”, *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2017, 22(1), 4-14.
- [98] J. Macknick, R. Newmark, G. Heath, K. C. Hallett, “Operational water consumption and withdrawal factors for electricity generating technologies: a review of existing literature”, *Environmental Research Letters*, 2012, 7(4), 045802.
- [99] N. C. Onat, M. Kucukvar, O. Tatari, “Well-to-wheel water footprints of conventional versus electric vehicles in the United States: A state-based comparative analysis”, *Journal of Cleaner Production*, 2018, 204, 788-802.
- [100] J. Meldrum, S. Nettles-Anderson, G. Heath, J. Macknick, “Life cycle water use for electricity generation: a review and harmonization of literature estimates”, *Environmental Research Letters*, 2013, 8(1), 015031.

- [101] X. Lai, C. Deng, J. Li, Z. Zhu, X. Han, Y. Zheng, "Rapid sorting and regrouping of retired lithium-ion battery modules for echelon utilization based on partial charging curves", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2021, 70(2), 1246–1254.
- [102] L. Lin, Z. Lu, W. Zhang, "Recovery of lithium and cobalt from spent Lithium-Ion batteries using organic aqua regia (OAR): Assessment of leaching kinetics and global warming potentials", *Resources, Conservation and Recycling*, 2021, 167, 105416.
- [103] M. Rinne, H. Elomaa, A. Porvali, M. Lundström, "Simulation-based life cycle assessment for hydrometallurgical recycling of mixed LIB and NiMH waste", *Resources, Conservation and Recycling*, 2021, 170, 105586.
- [104] E. Fan, L. Li, Z. Wang, J. Lin, Y. Huang, Y. Yao, F. Wu, "Sustainable recycling technology for Li-ion batteries and beyond: challenges and future prospects", *Chemical Reviews*, 2020, 120(14), 7020–7063.
- [105] G. Qian, Z. Li, Y. Wang, X. Xie, Y. He, J. Li, L. Li, "Value-creating upcycling of retired electric vehicle battery cathodes", *Cell Reports Physical Science*, 2022, 3(2).
- [106] M. A. Rajaeifar, M. Raugei, B. Steubing, A. Hartwell, P. A. Anderson, O. Heidrich, "Life cycle assessment of lithium-ion battery recycling using pyrometallurgical technologies", *Journal of Industrial Ecology*, 2021, 25(6), 1560–1571.
- [107] R. Sommerville, J. Shaw-Stewart, V. Goodship, N. Rowson, E. Kendrick, "A review of physical processes used in the safe recycling of lithium ion batteries", *Sustainable Materials and Technologies*, 2020, 25, e00197.
- [108] J. Chen, Z. Wang, Y. Wu, L. Li, B. Li, D. A. Pan, T. Zuo, "Environmental benefits of secondary copper from primary copper based on life cycle assessment in China", *Resources, Conservation and Recycling*, 2019, 146, 35–44.
- [109] R. Faria, P. Marques, R. Garcia, P. Moura, F. Freire, J. Delgado, A. T. de Almeida, "Primary and secondary use of electric mobility batteries from a life cycle perspective", *Journal of Power Sources*, 2014, 262, 169–177.
- [110] M. O. Ramoni, H. C. Zhang, "End-of-life (EOL) issues and options for electric vehicle batteries", *Clean Technologies and Environmental Policy*, 2013, 15(6), 881–891.
- [111] F. Hacker, R. Harthan, F. Matthes, W. Zimmer, "Environmental impacts and impact on the electricity market of a large scale introduction of electric cars in Europe-Critical Review of Literature", *ETC/ACC Technical Paper*, 2009, 4, 56–90.
- [112] L. Ahmadi, A. Yip, M. Fowler, S. B. Young, R. A. Fraser, "Environmental feasibility of re-use of electric vehicle batteries", *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2014, 6, 64–74.
- [113] S. Olapiriyakul, R. J. Caudill, "A framework for risk management and end-of-life (EOL) analysis for nanotechnology products: A case study in lithium-ion batteries", 2008, *IEEE International Symposium on Electronics and the Environment*, 1–6.
- [114] S. Manzetti, F. Mariasiu, "Electric vehicle battery technologies: From present state to future systems", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 51, 1004–1012.
- [115] E. Cready, J. Lippert, J. Pihl, I. Weinstock, P. Symons, "Technical and economic feasibility of applying used EV batteries in stationary applications", *Sandia National Lab.*, 2003, No. SAND2002-4084.
- [116] J. Neubauer, A. Pesaran, "The ability of battery second use strategies to impact plug-in electric vehicle prices and serve utility energy storage applications", *Journal of Power Sources*, 2011, 196(23), 10351–10358.
- [117] J. L. Sullivan, L. Gaines, "A review of battery life-cycle analysis: state of knowledge and critical needs", 2010.
- [118] J. Buekers, M. Van Holderbeke, J. Bierkens, L. I. Panis, "Health and environmental benefits related to electric vehicle introduction in EU countries", *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2014, 33, 26–38.
- [119] Y. Xing, E. W. Ma, K. L. Tsui, M. Pecht, "Battery management systems in electric and hybrid vehicles", *Energies*, 2011, 4(11), 1840–1857.
- [120] D. Larcher, J. M. Tarascon, "Towards greener and more sustainable batteries for electrical energy storage", *Nature Chemistry*, 2015, 7(1), 19–29.
- [121] S. M. Shin, N. H. Kim, J. S. Sohn, D. H. Yang, Y. H. Kim, "Development of a metal recovery process from Li-ion battery wastes", *Hydrometallurgy*, 2005, 79(3–4), 172–181.
- [122] J. C. Neto, M. M. Silva, S. M. Santos, "A time series model for estimating the generation of lead acid battery scrap", *Clean Technologies and Environmental Policy*, 2016, 18(6), 1931–1938.
- [123] J. Heelan, E. Gratz, Z. Zheng, Q. Wang, M. Chen, D. Apelian, Y. Wang, "Current and prospective Li-ion battery recycling and recovery processes", *JOM*, 2016, 68(10), 2632–2638.
- [124] K. Richa, C. W. Babbitt, G. Gaustad, X. Wang, "A future perspective on lithium-ion battery waste flows from electric vehicles", *Resources, Conservation and Recycling*, 2014, 83, 63–76.

ECE R100 V3'ÜN ÇEVRESEL YANSIMALARI VE TÜRKİYE'DEKİ UYUM DURUMU
Sermin Günaslan¹, Berrak Erol Nalbur²

¹Kastamonu Üniversitesi, Çevre Koruma Teknolojileri Bölümü, Kastamonu/ TÜRKİYE
E-Posta: gunaslansermin@gmail.com

²Bursa Uludağ Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Bursa/ TÜRKİYE
E-Posta: bnalbur@uludag.edu.tr

ÖZET

Küresel iklim değişikliği ve enerji bağımsızlığı arayışları, otomotiv sektöründe elektrikli ve hibrit araçlara hızlı bir geçişi tetiklemiştir. Bu dönüşümde, UNECE tarafından geliştirilen **ECE R100** yönetmeliği kritik rol oynamaktadır. Yönetmelik, elektrikli araçların batarya sistemleri, elektriksel yalıtım, termal kaçış ve kısa devre gibi risklere karşı güvenlik gerekliliklerini tanımlar.

Güncel **V3 versiyonu**, batarya yangınları, sıvı sızıntıları ve geri dönüşüm odaklı testleri zorunlu kılarak çevresel boyutu da düzenlemelere dahil etmiştir. “Liquid Leakage Test” gibi prosedürler, batarya soğutma sıvılarının çevresel ve güvenlik risklerini azaltmayı amaçlar. Ayrıca modülerlik, sökülebilirlik ve malzeme işaretleme gereklilikleri, bataryaların ikinci kullanımını ve değerli metallerin geri kazanımını kolaylaştırmaktadır.

Avrupa’da elektrikli araç satışları hızla artarken, Türkiye’de de 2023’te 68.700 satış gerçekleşmiştir. Ancak KOBİ’lerde test altyapısı ve mevzuata uyum konusunda zorluklar bulunmaktadır. Bu nedenle, akredite test merkezlerinin kurulması, bilgilendirme programları ve geri dönüşüm altyapısının geliştirilmesi önemlidir.

Sonuç olarak **ECE R100 V3**, yalnızca batarya güvenliğini değil; çevresel sürdürülebilirliği ve döngüsel ekonomi ilkelerini de destekleyen kapsamlı bir düzenleme olup, Türkiye’nin bu dönüşüme uyumu rekabet gücü ve sürdürülebilir ulaşım hedefleri açısından kritik öneme sahiptir.

Anahtar Kelimeler: ECE R100 V3, Batarya Güvenliği, Modüler batarya tasarımı, Döngüsel Ekonomi, Sürdürülebilir Ulaşım

ABSTRACT

Global climate change and the pursuit of energy independence have triggered a rapid transition toward

electric and hybrid vehicles in the automotive sector. In this transformation, the ECE R100 regulation developed by UNECE plays a critical role. The regulation defines safety requirements for electric vehicle battery systems, electrical insulation, thermal runaway, and short-circuit risks.

The latest V3 version incorporates environmental aspects by mandating tests on battery fires, liquid leakages, and recyclability. Procedures such as the “Liquid Leakage Test” aim to minimize environmental and safety risks associated with battery cooling fluids. In addition, requirements for modularity, disassembly, and material labeling facilitate second-life applications and the recovery of valuable metals.

While electric vehicle sales are rapidly increasing in Europe, Turkey also recorded 68,700 sales in 2023. However, SMEs face challenges in test infrastructure and regulatory compliance. Therefore, the establishment of accredited test centers, awareness programs, and recycling infrastructure aligned with the regulation is of great importance.

In conclusion, ECE R100 V3 is not only a technical framework for battery safety but also a comprehensive regulation supporting environmental sustainability and circular economy principles. Turkey’s alignment with this transformation is crucial for both competitive strength and sustainable mobility goals.

Keywords: ECE R100 V3, Battery Safety, Modular Battery Design, Circular Economy, Sustainable Mobility

1. GİRİŞ

Hibrit elektrikli araçlar da dahil olmak üzere, elektrikli araçların küresel çapta hızla yaygınlaşması, iklim değişikliği ve çevresel etkiyi azaltmanın önemli yollarından biri haline gelmiştir.

2018 ile 2024 yılları arasında, EV satışları keskin bir artış göstermiş ve yalnızca 2023 ile 2024 yılları arasında %21'lik bir büyüme oranına ulaşmıştır [1]. Son yıllarda, küresel otomotiv endüstrisi elektrikli araçların pazarda önemli ölçüde yer aldığı fark etmiştir [2-4]. Spielbauer ve çalışma arkadaşları, gelecekte batarya yangınlarının sıklığı ve şiddetinde artış yaşanacağını; bunun özellikle yeni nesil hücrelerin artan enerji yoğunluğu ile elektrikli araçlar ve bu araçlarda kullanılan bataryalara yönelik talebin yükselmesinden kaynaklanacağını öngörmektedir [5]. Wang ve diğerleri, Kubjatko, Goodman ve diğerleri ve Pan ve diğerlerine göre, bir kazaya maruz kalan elektrikli araçlar, bataryayı mekanik olarak deforme edebilir veya tamamen arızalanabilir [6-8]. Batarya arızasına neden olabilecek temel nedenler: dahili hücre kısa devresi [9], mekanik deformasyon ve darbe, şarj, harici kısa devre, yüksek sıcaklığa maruz kalma [10],deşarj [11] ve termal kaçaktır [7, 12-15]. Araçlar önden, yandan ve arkadan çarpışmalar ve özellikle devrilmeler dahil olmak üzere çeşitli darbe türlerine maruz kalabilmektedir [16]. Bu durum, yapısal hasarın en aza indirilmesi ve enerji depolama sistemlerinde meydana gelebilecek felaket boyutundaki arızaların önlenmesi için özel koruma stratejilerinin uygulanmasını gerektirmektedir [17]. Bu doğrultuda, uluslararası düzenlemeler asgari performans ve güvenlik standartlarının belirlenmesinde kritik bir işlev üstlenmektedir. UNECE Yönetmeliği No. 100, elektrikli araçların elektrik güvenliğine ilişkin tip onay sürecini kapsamlı biçimde düzenlemekte ve şarj edilebilir enerji depolama sistemlerine yönelik gereklilikleri ortaya koymaktadır

2. ECE R100 YÖNETMELİĞİNİN GENEL ÇERÇEVESİ VE REV.1–REV.2 DÖNEMLERİ

Elektrikli araçların güvenlik gereklilikleri, uluslararası düzeyde standardizasyon çalışmalarıyla belirlenmekte olup, bu alandaki en önemli düzenlemelerden biri Birleşmiş Milletler Avrupa Ekonomik Komisyonu (UNECE) tarafından yayımlanan ECE R100 yönetmeliğidir. Yönetmelik, elektrikli tahrik sistemine sahip kara yolu taşıtlarının tip onayı sürecinde karşılaması gereken asgari teknik gereklilikleri tanımlar. Böylece hem araç içi yolcu güvenliğinin hem de çevresel risklerin kontrol altına alınması amaçlanmaktadır (UNECE, 2013).

Yönetmeliğin kapsamı esas olarak iki bölümden oluşmaktadır:

Bölüm I – Genel Araç Güvenliği: Yüksek voltaj sistemlerinin yolcu, sürücü ve üçüncü şahıslar için oluşturabileceği risklerin değerlendirilmesini, elektriksel izolasyon, koruyucu topraklama, kısa devre önleme ve şasiye karşı direnç gibi testleri içerir.

Bölüm II – Şarj Edilebilir Enerji Depolama Sistemleri (RESS): Batarya paketlerinin ve süper kapasitörlerin mekanik darbe, sıcaklık değişimleri, titreşim ve aşırı şarja karşı dayanıklılığı; yangın ve patlama risklerine karşı testleri kapsar. Ayrıca sökülebilirlik ve geri dönüştürülebilirlik kriterleri giderek önem kazanmıştır (UNECE, 2021).

ECE R100 yönetmeliği, elektrikli araç üreticileri için yalnızca teknik bir kılavuz değil, aynı zamanda Avrupa pazarına giriş için zorunlu bir homologasyon (tip onayı) şartıdır. Bu nedenle uyum sağlanmadığı sürece araçların AB ülkelerinde satışı mümkün değildir.

Rev.1 ve Rev.2 Dönemleri

ECE R100'un ilk versiyonları öncelikle elektriksel güvenlik üzerine yoğunlaşmıştır. Rev.1 (2010) ile yüksek voltajlı bileşenlerde yalıtım direnci, kablo bağlantılarının bütünlüğü ve kısa devre riskine karşı testler tanımlanmış; ayrıca RESS güvenlik performansı kapsamı içine alınmıştır (UNECE, 2010).

Rev.2 (2013) güncellemesi ile batarya paketlerinin darbe, titreşim ve sıcaklık değişimlerine karşı dayanıklılığı için ek testler getirilmiştir (UNECE, 2013). Bu dönemde literatürde özellikle lityum-iyon bataryaların güvenlik açıkları (termal runaway, gaz çıkışı, yangın riski) vurgulanmıştır [18, 19]. Rev.2'nin en önemli katkısı araç içi güvenlik önlemlerinin netleşmesi olmuş, ancak çevresel etkiler sınırlı düzeyde ele alınmıştır.

Rev.1 ve Rev.2 daha çok araç içi güvenlik odaklı iken, Rev.3 ile birlikte yaşam döngüsü yönetimi ve çevresel sürdürülebilirlik kavramları düzenlemenin merkezine alınmıştır. Bu yönüyle ECE R100, yalnızca teknik bir güvenlik standardı değil, aynı zamanda Avrupa Birliği'nin Yeşil Mutabakatı ve Döngüsel Ekonomi Eylem Planı ile de uyumlu bir politika aracıdır (European Commission, 2020). Literatürde batarya modülerliği ve geri dönüşümün elektrikli araçların çevresel ayak izini azaltmada kritik öneme sahip olduğu vurgulanmaktadır (Gaines, 2014; Bobba et al., 2019).

2.1.ECE R100 REV.3'ÜN GETİRDİĞİ YENİLİKLER

Elektrikli araç teknolojilerinin hızla gelişmesi ve kullanım oranlarının artması, ECE R100 yönetmeliğinde yeni düzenlemeleri zorunlu kılmıştır. Bu ihtiyaç doğrultusunda 2021 yılında yürürlüğe giren ECE R100 Rev.3 (V3), önceki revizyonlardan farklı olarak yalnızca güvenlik odaklı değil, aynı zamanda çevresel sürdürülebilirliği de kapsayan bütüncül bir yaklaşım getirmiştir (UNECE, 2021).

2.2. BATARYA YANGINLARINA KARŞI YENİ TESTLER

Rev.3 ile batarya paketlerinin aşırı ısınma, içsel kısa devre veya dışsal etkiler sonucu meydana gelebilecek yangın senaryoları için yeni test prosedürleri tanımlanmıştır. Bu testlerde bataryaların yangın karşısında patlama veya aşırı gaz çıkışı olmadan belirli bir süre dayanması beklenmektedir. Böylece araç yolcularının güvenli tahliyesi için zaman kazanılması amaçlanmaktadır (Zhao et al., 2021).

2.2.1. SIVI SIZINTI TESTİ

Rev.3'ün en önemli yeniliklerinden biri, sıvı sızıntı testi olmuştur. Elektrikli araçlarda yaygın olarak kullanılan etilen glikol, propilen glikol veya dielektrik özellikli özel soğutma sıvılarının batarya hasarı durumunda dışarı sızıp sızmadığı değerlendirilir. Sızıntı durumunda hem çevresel kirlenme hem de elektriksel kısa devre ve termal runaway riski oluşabileceğinden, bu test araç güvenliği ve çevresel koruma açısından kritik önemdedir [20].

2.2.2. OTOMATİK DEVRE DIŞI BIRAKMA MEKANİZMALARI

Rev.3, batarya sistemlerinde akıllı koruma devrelerini zorunlu hale getirmiştir. Aşırı sıcaklık, aşırı akım veya anormal çalışma koşullarında bataryanın kendini güvenli bir şekilde devre dışı bırakması gerekmektedir. Bu sayede batarya paketinin hasar alması veya yangına yol açması engellenmektedir [21].

2.2.3. MODÜLERLİK VE SÖKÜLEBİLİRLİK

Rev.3, bataryaların modüler tasarım ile üretilmesini teşvik etmektedir. Bu yaklaşım sayesinde:

- Sağlam modüller ikinci kullanım (ör. sabit enerji depolama) için değerlendirilebilir.

- Hasarlı modüller daha etkin geri dönüştürülebilir.
- Tehlikeli bileşenlerin etiketlenmesi ve kolay sökülebilir bağlantılar sayesinde geri dönüşüm tesislerinde güvenlik artırılabilir.

Bu özellik, bataryaların döngüsel ekonomi ilkelerine uygun şekilde yönetilmesini kolaylaştırmaktadır [22].

2.2.4. ÇEVRESEL BOYUTUN GÜÇLENDİRİLMESİ

Önceki revizyonlarda çevresel etkiler sınırlı düzeyde ele alınırken, Rev.3 ile birlikte batarya kullanım ömrü sonrasına dair hükümler düzenlemeye dahil edilmiştir. Özellikle:

- Tehlikeli maddelerin işaretlenmesi,
- Malzemelerin tanımlanabilir olması,
- Geri dönüşüm süreçlerine uygun tasarım kriterleri,

zorunlu hale getirilmiştir [23, 24]. Bu hükümler, Avrupa Birliği'nin Yeşil Mutabakat ve Kritik Hammaddeler Stratejisi ile de doğrudan uyumludur.

3. ATIK YÖNETİMİ VE DÖNGÜSEL EKONOMİ

Bataryaların ömrünü tamamlamasının ardından uygun şekilde toplanması, sökülmesi ve geri dönüştürülmesi çevresel risklerin azaltılmasında kritik rol oynamaktadır. Bu noktada ECE R100 Rev.3'ün modülerlik ve sökülebilirlik hükümleri, geri dönüşüm süreçlerinin daha güvenli ve etkin şekilde yürütülmesine katkı sağlamaktadır. Ayrıca sağlam modüllerin ikinci kullanım (second-life) senaryolarında, örneğin sabit enerji depolama sistemlerinde değerlendirilmesi, hem kaynak verimliliğini hem de çevresel sürdürülebilirliği artırmaktadır [22].

4.DÖNGÜSEL EKONOMİ VE BATARYA YÖNETİMİ

Elektrikli araçların yaygınlaşması ile birlikte batarya üretiminde kullanılan lityum, nikel, kobalt ve mangan gibi kritik hammaddelerin talebi hızla artmaktadır. Bu hammaddeler sınırlı rezervlere sahip olmalarının yanı sıra, çıkarıldıkları bölgelerde sosyal ve çevresel sorunlara da yol açmaktadır [25, 26]. Bu nedenle, bataryaların yaşam döngüsü sonrasında döngüsel ekonomi prensiplerine uygun olarak yönetilmesi, sürdürülebilir ulaşım hedeflerinin ayrılmaz bir parçasıdır.

4.1. MODÜLERLİK VE İKİNCİ KULLANIM

ECE R100 Rev.3 ile birlikte batarya tasarımında modüler yapının teşvik edilmesi, döngüsel ekonomi açısından kritik bir gelişmedir. Modüler tasarım sayesinde:

- Sağlam modüller ikinci kullanım (second-life) senaryolarında sabit enerji depolama sistemlerinde değerlendirilebilir.
- Hasar görmüş modüller kolaylıkla ayrıştırılarak geri dönüştürülebilir.
- Tehlikeli bileşenler ayrı işaretlenerek geri dönüşüm tesislerinde güvenli işlem sağlanır [22].

Bu yaklaşım, bataryaların ömrünü uzatmakta ve kaynakların daha verimli kullanılmasına katkı sağlamaktadır.

4.2. GERİ DÖNÜŞÜM SÜREÇLERİ

Bataryaların geri dönüşümü, içerdikleri değerli metallerin yeniden kazanılmasını sağlar. Günümüzde üç temel yöntem öne çıkmaktadır:

- Pirometalurjik yöntemler: Yüksek sıcaklıklarda eritme yoluyla kobalt, nikel ve bakır gibi metallerin geri kazanımı.
- Hidrometalurjik yöntemler: Asidik çözeltiler ile lityum ve kobalt gibi metallerin çözündürülerek geri kazanımı.
- Doğrudan geri dönüşüm: Aktif katot malzemelerinin yapısal özelliklerini koruyarak yeniden kullanıma kazandırılması [23].

Bu yöntemlerin çevresel etkilerinin minimize edilmesi için, AB'nin Döngüsel Ekonomi Eylem Planı ve yeni Batarya Yönetmeliği (2023/1542/EU), geri dönüşüm oranları ve hammadde geri kazanım verimliliği için bağlayıcı hedefler getirmiştir (European Parliament, 2023).

4.3. TÜRKİYE AÇISINDAN ÖNEMİ

Türkiye'de elektrikli araç pazarı hızla büyürken, batarya geri dönüşüm altyapısı henüz gelişim aşamasındadır. ECE R100 Rev.3'ün modülerlik ve sökülebilirlik hükümleri, Türkiye'nin bu alandaki yatırımlarını yönlendirecek niteliktedir. Özellikle:

- Akredite geri dönüşüm tesislerinin kurulması,
- KOBİ'ler için rehberlik programları,
- Devlet teşviklerinin geri dönüşüm yatırımları ile ilişkilendirilmesi,

Türkiye'nin döngüsel ekonomi vizyonuna katkı sağlayacaktır.

4.4. KÜRESEL POLİTİKALARLA UYUM

ECE R100 Rev.3'ün getirdiği hükümler, Avrupa Birliği'nin Yeşil Mutabakatı, Döngüsel Ekonomi Eylem Planı ve Kritik Hammaddeler Stratejisi ile doğrudan örtüşmektedir. Bu uyum, sadece teknik bir zorunluluk değil, aynı zamanda uluslararası pazarda rekabet gücü için de stratejik bir avantajdır [24].

5. AVRUPA VE TÜRKİYE'DE ELEKTRİKLİ ARAÇ PAZARI

Elektrikli araçların (EV) küresel ölçekte benimsenmesi, iklim değişikliği ile mücadele ve enerji bağımsızlığı hedeflerinin bir yansımasıdır. Avrupa Birliği ve Türkiye'de son yıllarda elektrikli araç pazarında dikkat çekici bir büyüme yaşanmakta, bu büyüme ECE R100 Rev.3 gibi güvenlik ve çevre odaklı düzenlemelerin önemini daha da artırmaktadır.

5.1. AVRUPA'DA ELEKTRİKLİ ARAÇ PAZARI

Avrupa Birliği'nde elektrikli araçların yaygınlaşması, AB Yeşil Mutabakatı ve Fit for 55 hedefleri doğrultusunda hız kazanmıştır. Avrupa Otomobil Üreticileri Birliği (ACEA) verilerine göre, 2023 yılında AB-27 ülkelerinde satılan yeni araçların %22,7'si elektrikli araçlardan oluşmuştur. Bu oran, 2022'de %12,1 idi ve yalnızca bir yıl içinde yaklaşık iki kat artış anlamına gelmektedir (ACEA, 2024). 2023 yılında yeni tesciller içinde batarya elektrikli araçların (BEV) payı %14,6'ya ulaşırken, plug-in hibrit araçların (PHEV) payı %8,1 olarak gerçekleşmiştir. Bu eğilim, AB ülkelerinin hem karbon emisyonlarını azaltma hedefleri hem de petrol bağımlılığını azaltma stratejileri ile doğrudan ilişkilidir (IEA, 2023). Ayrıca, Avrupa'daki birçok ülke 2035 itibarıyla içten yanmalı motorlu araçların satışını yasaklamayı planlamakta olup, bu hedefler elektrikli araç pazarını daha da büyütecektir.

5.2. TÜRKİYE'DE ELEKTRİKLİ ARAÇ PAZARI

Türkiye'de elektrikli araç pazarı, son yıllarda hızlı bir büyüme göstermektedir. 2022 yılında yalnızca 7.540 adet elektrikli araç satılırken, 2023 yılında bu sayı 68.700 adede ulaşmıştır (ODMD, 2024). Bu satışların yaklaşık %96'sı batarya elektrikli araçlardan (BEV) oluşmuş, hibrit elektrikli araçların payı ise sınırlı kalmıştır.

Türkiye'deki bu artış, hem küresel trendlerin yansıması hem de yerli üretim girişimleri (örneğin TOGG) ile doğrudan ilişkilidir. Ancak, pazardaki hızlı büyümeye rağmen, ECE R100 Rev.3'e uyum konusunda özellikle KOBİ ölçeğindeki tedarikçilerde zorluklar yaşanmaktadır. Test altyapısının sınırlı

olması, güncel mevzuata erişimde yaşanan güçlükler ve yüksek uyum maliyetleri bu sürecin temel engelleri arasında yer almaktadır (TAYSAD, 2023).

5.3. KARŞILAŞTIRMALI DEĞERLENDİRME

- Avrupa’da elektrikli araç pazarındaki büyüme politika yönlendirmeleri (AB Yeşil Mutabakatı, karbon nötr hedefler) ile desteklenmektedir.
- Türkiye’deki büyüme ise daha çok pazar talebi ve yerli üretim motivasyonu ile ilişkilidir.
- Avrupa ülkeleri, ECE R100 Rev.3 gibi standartlara tam uyumlu test altyapılarını hızla geliştirmiştir.
- Türkiye’de ise test merkezlerinin yetersizliği ve tedarik zincirinde farkındalık eksikliği, uluslararası pazarda rekabet gücünü sınırlayan unsurlar olarak öne çıkmaktadır.

5.4. GELECEK PERSPEKTİFİ

Avrupa’da elektrikli araç pazarının 2030 itibarıyla toplam satışların %50’sini aşması beklenmektedir (IEA, 2023). Türkiye’de de benzer şekilde, özellikle batarya üretim yatırımları ve AB ile uyumlu düzenlemeler sayesinde pazarın büyümeye devam edeceği öngörülmektedir. Türkiye’nin bu dönüşümde güçlü bir konum elde edebilmesi için, ECE R100 Rev.3’e tam uyum sağlaması ve geri dönüşüm altyapısını AB standartlarıyla uyumlu hale getirmesi kritik olacaktır.

6. TÜRKİYE İÇİN UYUM STRATEJİLERİ

Türkiye’de elektrikli araç pazarı son yıllarda hızlı bir büyüme göstermiştir. Ancak, bu büyümenin kalıcı ve sürdürülebilir olabilmesi için ECE R100 Rev.3 standardına tam uyum sağlanması kritik öneme sahiptir. Türkiye’nin elektrikli araç ekosistemi, özellikle ana sanayi firmalarının güçlü üretim kapasitesi sayesinde avantajlı bir konumda olsa da, tedarik zincirinde yer alan küçük ve orta ölçekli işletmeler (KOBİ) açısından ciddi uyum sorunları bulunmaktadır (TAYSAD, 2023). Bu bölümde, Türkiye’nin ulusal ve sektörel stratejiler çerçevesinde uyum sürecinde izlemesi gereken temel adımlar ele alınmaktadır.

6.1. AKREDİTE TEST MERKEZLERİNİN KURULMASI

ECE R100 Rev.3’te öngörülen testlerin (ör. Liquid Leakage Test, yangın dayanım testleri, modülerlik denetimleri) gerçekleştirilebilmesi için akredite

laboratuvarlara ihtiyaç duyulmaktadır. Türkiye’de mevcut altyapı sınırlı olduğundan, uluslararası akreditasyona sahip test merkezlerinin kurulması hem üreticilerin Avrupa pazarına erişimini kolaylaştıracak hem de yurtdışına bağımlı test maliyetlerini azaltacaktır (Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, 2023).

6.2. KOBİ’LER İÇİN EĞİTİM VE REHBERLİK PROGRAMLARI

Türkiye otomotiv sektörü büyük ölçüde KOBİ’lerden oluşmaktadır. Ancak bu işletmelerin güncel teknik mevzuata erişimi ve uygulama kapasiteleri sınırlıdır. Bu nedenle:

- Eğitim programları,
- Teknik rehberlik destekleri,
- Standardizasyon kılavuzları

hazırlanarak tedarikçilerin farkındalığı artırılmalı ve uyum maliyetleri azaltılmalıdır.

6.3. GERİ DÖNÜŞÜM ALTYAPISININ GÜÇLENDİRİLMESİ

Elektrikli araç bataryalarının ömrü sonunda çevresel yük oluşturmaması için geri dönüşüm tesislerinin kurulması ve AB’nin Batarya Yönetmeliği ile uyumlu hale getirilmesi gerekmektedir. Türkiye’nin bu alanda yatırım yapması, yalnızca çevresel sürdürülebilirliği sağlamakla kalmayacak, aynı zamanda kritik hammaddelerin geri kazanımı açısından da stratejik bir avantaj sunacaktır (European Parliament, 2023).

6.4. DEVLET TEŞVİKLERİ VE POLİTİKA ENTEGRASYONU

ECE R100 Rev.3’e uyum sağlamak için yapılacak yatırımların maliyeti yüksektir. Bu nedenle devlet teşvikleri kritik rol oynamaktadır.

- Ar-Ge destekleri,
- Yeşil dönüşüm fonları,
- Vergi indirimleri

gibi mekanizmalar, hem ana sanayi hem de tedarikçiler için uyum sürecini hızlandıracaktır. Ayrıca, Türkiye’nin 2053 net sıfır hedefi kapsamında ulusal politika belgeleri ile AB Yeşil Mutabakatı arasındaki uyum da stratejik önem taşımaktadır.

6.5. STRATEJİK İŞBİRLİKLERİ

Türkiye, Avrupa Birliği ile entegrasyon sürecinde, ortak Ar-Ge projeleri, teknoloji transferi anlaşmaları ve uluslararası konsorsiyumlara katılım gibi stratejik işbirlikleri ile hem bilgi birikimini artırabilir hem de küresel rekabet gücünü yükseltebilir. Bu işbirlikleri aynı zamanda üniversite-sanayi ortaklıklarını

güçlendirecek ve yerli batarya teknolojilerinin gelişimine katkı sağlayacaktır.

7. TARTIŞMA

Elektrikli araçların yaygınlaşması, yalnızca teknolojik bir dönüşüm değil, aynı zamanda enerji politikaları, çevresel sürdürülebilirlik ve endüstriyel rekabet açısından da çok boyutlu sonuçlar doğurmaktadır. Bu bağlamda ECE R100 Rev.3 standardı, elektrikli araçların güvenlik parametrelerini tanımlamakla kalmayıp, aynı zamanda çevresel etkileri ve yaşam döngüsü yönetimini de düzenleme kapsamına dahil ederek kritik bir rol üstlenmektedir.

7.1. TEKNİK GEREKLİLİKLER VE GÜVENLİK BOYUTU

Rev.3 ile getirilen yangın dayanımı, liquid leakage test, otomatik devre dışı bırakma ve modülerlik kriterleri, elektrikli araçların güvenlik standartlarını önceki versiyonlara kıyasla ciddi biçimde yükseltmiştir (UNECE, 2021). Bu gereklilikler, batarya kaynaklı yangın, kısa devre ve sızıntı gibi risklerin minimize edilmesini sağlamaktadır. Ancak literatürde, bu testlerin gerçek kaza koşullarını ne ölçüde simüle ettiği konusunda tartışmalar sürmektedir [19].

7.2. ÇEVRESEL SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK VE DÖNGÜSEL EKONOMİ

ECE R100 Rev.3'ün en yenilikçi yönü, çevresel sürdürülebilirliği teknik güvenlik düzenlemeleriyle bütünleştirmesidir. Bataryaların sökülebilir, modüler ve geri dönüştürülebilir tasarlanması, döngüsel ekonomi hedefleriyle doğrudan ilişkilidir. Harper ve arkadaşları [22] bu yaklaşımın, batarya atıklarının çevresel yükünü azaltmada ve kritik hammaddelerin yeniden kazanılmasında büyük potansiyel sunduğunu belirtmektedir. Bununla birlikte, geri dönüşüm teknolojilerinin henüz yüksek maliyetli ve enerji yoğun olması, uygulamadaki en büyük engellerden biridir [23].

7.3. TÜRKİYE'NİN UYUM SÜRECİNDEKİ GÜÇLÜKLER

Türkiye'de elektrikli araç pazarının büyüme hızı yüksek olsa da, ECE R100 Rev.3'e uyum süreci özellikle KOBİ'ler için önemli bir yük oluşturmaktadır. Test merkezlerinin sınırlı olması, mevzuata erişimde zorluklar ve maliyet baskısı, uyum sürecini yavaşlatmaktadır (TAYSAD, 2023). Öte yandan, devlet teşvikleri, AB ile uyumlu regülasyonlar

ve yerli üretim projeleri (ör. TOGG) bu sürecin hızlandırılmasında önemli araçlar olarak görülmektedir.

7.4. ULUSLARARASI REKABET GÜCÜ

ECE R100 Rev.3 standardına uyum sağlamak, Türkiye için yalnızca teknik bir zorunluluk değil, aynı zamanda uluslararası rekabet gücü açısından da stratejik bir gerekliliktir. AB pazarına erişim, bu standartlara tam uyumu şart koşturmaktadır. Türkiye'nin bu dönüşümü gerçekleştirebilmesi halinde, yalnızca iç pazarda değil, aynı zamanda ihracat odaklı üretimde de güçlü bir konum elde etmesi mümkündür (European Commission, 2020; ACEA, 2024).

7.5. GENEL DEĞERLENDİRME

ECE R100 Rev.3, güvenlik ve çevresel sürdürülebilirliği birlikte ele almasıyla önceki versiyonlardan ayrılmaktadır. Ancak uygulamadaki zorluklar, özellikle gelişmekte olan ülkelerde sürecin yavaş ilerlemesine neden olmaktadır. Bu nedenle, teknik standartların uygulanabilirliğini artıracak politik destekler, altyapı yatırımları ve uluslararası işbirlikleri kritik önem taşımaktadır.

8. SONUÇ

Elektrikli ve hibrit araçların küresel ölçekte hızla yaygınlaşması, hem iklim değişikliği ile mücadele hem de enerji bağımsızlığı hedefleri açısından stratejik bir öneme sahiptir. Bu dönüşümün güvenli ve sürdürülebilir bir şekilde gerçekleşebilmesi için uluslararası teknik standartların uygulanması kritik rol oynamaktadır. Bu bağlamda, ECE R100 Rev.3 yönetmeliği, yalnızca araç güvenliğini düzenleyen bir standart olmaktan çıkmış; aynı zamanda batarya sistemlerinin çevresel sürdürülebilirlik ve döngüsel ekonomi ilkeleri doğrultusunda yönetimini de kapsayan bütüncül bir regülasyon haline gelmiştir.

Rev.3 ile getirilen yangın dayanım testleri, liquid leakage test, otomatik devre dışı bırakma mekanizmaları ve modüler batarya tasarımı gibi yenilikler, elektrikli araçların güvenlik seviyesini artırırken aynı zamanda kullanım ömrü sonunda ortaya çıkabilecek çevresel risklerin azaltılmasını da sağlamaktadır. Bu hükümler, Avrupa Birliği'nin Yeşil Mutabakatı ve Kritik Hammaddeler Stratejisi ile doğrudan uyumlu olup, küresel ölçekte sürdürülebilir ulaşım hedeflerine katkıda bulunmaktadır.

Türkiye açısından bakıldığında, elektrikli araç pazarı son yıllarda hızlı bir büyüme göstermiştir. Ancak, bu

büyümenin uluslararası standartlarla uyumlu hale getirilebilmesi için akredite test merkezlerinin kurulması, KOBİ'lere yönelik rehberlik programları, geri dönüşüm altyapısının güçlendirilmesi ve devlet teşviklerinin yeşil dönüşüm yatırımlarıyla ilişkilendirilmesi gerekmektedir. Bu adımların hayata geçirilmesi, Türkiye'nin yalnızca iç pazarda güvenli ve sürdürülebilir üretim yapabilmesini değil, aynı zamanda uluslararası rekabet gücünü de artırmasını sağlayacaktır.

Sonuç olarak, ECE R100 Rev.3, elektrikli araçlarda güvenlik ve çevre boyutlarını bütünleştiren kapsamlı bir standart olarak, sürdürülebilir ulaşımın temel yapı taşlarından biri haline gelmiştir. Türkiye'nin bu dönüşüm sürecine uyum sağlaması, hem çevresel etkilerin azaltılmasına hem de ekonomik kalkınmaya katkı sağlayarak, ülkenin sürdürülebilir bir geleceğe doğru ilerleyişinde kritik bir rol oynayacaktır.

Teşekkür

Yazarlar, 22AG001-TÜBİTAK 1004 numaralı proje kapsamında bu araştırmayı destekleyen Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumuna (TÜBİTAK) teşekkürlerini sunar.

REFERANSLAR

1. Agency, I.E., *Global EV Outlook 2020: Entering the decade of electric drive?* 2020, OECD Publishing.
2. Kotak, B. and Y. Kotak, *Review of European Regulations and Germany's Action to Reduce Automotive Sector Emissions*. European Transport-Transporti Europei, 2016(61).
3. Machuca, E., et al., *Availability of lithium ion batteries from hybrid and electric cars for second use: how to forecast for germany until 2030*. Journal of Electrical Engineering, 2018. **6**(3): p. 129-143.
4. Kotak, B., et al., *Battery Crush Test Procedures in Standards and Regulation: Need for Augmentation and Harmonisation*. Batteries, 2021. **7**(3): p. 63.
5. Spielbauer, M., et al., *Experimental study of the impedance behavior of 18650 lithium-ion battery cells under deforming mechanical abuse*. Journal of Energy Storage, 2019. **26**: p. 101039.
6. Wang, W., et al., *Mechanical and electrical response of cylindrical Lithium-ion cells at various State of Charge*. Energy Procedia, 2018. **145**: p. 128-132.
7. Goodman, J.K.S., et al., *Lithium-ion cell response to mechanical abuse: Three-point bend*. Journal of Energy Storage, 2020. **28**: p. 101244.
8. Pan, Z., W. Li, and Y. Xia, *Experiments and 3D detailed modeling for a pouch battery cell under impact loading*. Journal of Energy Storage, 2020. **27**: p. 101016.
9. Zhao, W., G. Luo, and C.-Y. Wang, *Modeling internal shorting process in large-format Li-ion cells*. Journal of the electrochemical society, 2015. **162**(7): p. A1352.
10. Bisschop, R., et al., *Fire safety of lithium-ion batteries in road vehicles*. 2019.
11. Hendricks, C., et al., *A failure modes, mechanisms, and effects analysis (FMMEA) of lithium-ion batteries*. Journal of Power Sources, 2015. **297**: p. 113-120.
12. Spray, R., M. Barry, and J. Vickery, *Understanding downstream risk from lithium-ion battery thermal runaway & designing for safety*. ECS Transactions, 2019. **89**(1): p. 65.
13. Li, W., et al., *Comparative study of mechanical-electrical-thermal responses of pouch, cylindrical, and prismatic lithium-ion cells under mechanical abuse*. Science China Technological Sciences, 2018. **61**(10): p. 1472-1482.
14. Jeevarajan, J.A. and A. Hall, *Study of the intrinsic safety features in a cylindrical Li-ion cell*. ECS Transactions, 2006. **1**(24): p. 1.
15. Liao, Z., et al., *Hazard analysis of thermally abused lithium-ion batteries at different state of charges*. Journal of energy storage, 2020. **27**: p. 101065.
16. Dong, M., et al., *Research on electric vehicle rollover prevention system based on motor speed control*. World Electric Vehicle Journal, 2021. **12**(4): p. 195.
17. Victor Chombo, P., Y. Laonual, and S. Wongwises, *Lessons from the electric*

- vehicle crashworthiness leading to battery fire*. Energies, 2021. **14**(16): p. 4802.
18. Spotnitz, R. and J. Franklin, *Abuse behavior of high-power, lithium-ion cells*. Journal of power sources, 2003. **113**(1): p. 81-100.
 19. Larsson, F., *Lithium-ion battery safety-assessment by abuse testing, fluoride gas emissions and fire propagation*. 2017: Chalmers Tekniska Hogskola (Sweden).
 20. Zhang, J., et al., *An overview on thermal safety issues of lithium-ion batteries for electric vehicle application*. Ieee Access, 2018. **6**: p. 23848-23863.
 21. Deng, J., et al., *Progress in battery safety modeling*. Progress in Energy, 2022. **4**(4): p. 043001.
 22. Harper, G., et al., *Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles*. Nature, 2019. **575**(7781): p. 75-86.
 23. Gaines, L., *The future of automotive lithium-ion battery recycling: Charting a sustainable course*. Sustainable Materials and Technologies, 2014. **1**: p. 2-7.
 24. Bobba, S., F. Mathieux, and G.A. Blengini, *How will second-use of batteries affect stocks and flows in the EU? A model for traction Li-ion batteries*. Resources, Conservation and Recycling, 2019. **145**: p. 279-291.
 25. takiben Avrupa, A. and A. Birliği'nin, *Elektrikli Araçların İhtiyacı Olan Hammaddelerin Dünyadaki Tedarik Durumu*.
 26. Alliance, G.B. *A vision for a sustainable battery value chain in 2030: Unlocking the full potential to power sustainable development and climate change mitigation*. in *World Economic Forum: Geneva, Switzerland*. 2019.

ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN PLASTİK ALT KORUYUCU KAPAK TASARIMI VE TOPOLOJİ OPTİMİZASYONU

Emin Sezgin¹, Cengiz Altın¹, Celalettin Yüce²

¹Step-Turkey Tasarım Merkezi. 23 Nisan Mah. 249. Sk. No:15 /1 16230, Bursa, TÜRKİYE

Tel: 224 211 22 47 E-Posta emin.sezgin@step-tr.com

² Bursa Uludağ Üniversitesi. Makine Mühendisliği Bölümü, Bursa, TÜRKİYE

Tel: 224 294 19 59 E-Posta cyuce@uludag.edu.tr

Özet- Bu çalışmada, elektrikli araçların alt kısmında konumlanan plastik koruyucu kapağın mevcut tasarımı sonlu elemanlar analizi (FEA) yöntemiyle değerlendirilmiştir. İlk aşamada, parçanın maruz kaldığı yükleme koşulları dikkate alınarak sayısal model oluşturulmuş ve yapının davranışını etkileyen feder geometrilerinin konumları incelenmiştir. Analizler sonucunda, gerilme yığılmalarının ortaya çıktığı bölgeler, olası deformasyon alanları ve yapısal zayıflık noktaları belirlenmiştir. Elde edilen bu veriler, daha dayanıklı ve hafif bir tasarım geliştirilmesine yönelik topoloji optimizasyonu süreci için temel teşkil etmiştir. Topoloji optimizasyonu aşamasında otomotiv sektöründe yaygın kullanılan plastik malzemeler göz önünde bulundurulmuş; rijitlik, gerilme sınırları ve üretilebilirlik kısıtları dikkate alınmıştır. Optimizasyon çıktıları doğrultusunda yeniden tasarım çalışmaları yürütülmüş ve sonuçta hem hafifletilmiş hem de statik dayanım açısından güvenilir bir yapı elde edilmiştir. Yapılan hesaplamalar, parça kütlesinde yaklaşık %15 oranında bir azalma sağlanabileceğini göstermektedir. Bu iyileştirme, elektrikli araçlarda enerji verimliliğine katkı sunarken aynı zamanda üretim maliyetlerinde de kayda değer avantajlar sağlamaktadır. Son aşamada gerçekleştirilen doğrulama analizleri, optimize edilen tasarımın öngörülen yükleme koşulları altında güvenli biçimde çalıştığını ortaya koymuştur. Bu bulgular, otomotiv endüstrisinde hafiflik ve dayanımın birlikte sağlanmasına yönelik mühendislik yaklaşımlarına önemli katkılar sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Elektrikli araçlar, Sonlu elemanlar analizi (FEA), Topoloji optimizasyonu, Hafifletilmiş tasarım, Plastik malzemeler

1. GİRİŞ

Küresel ölçekte çevresel sürdürülebilirliğe duyulan ilginin artması ve fosil yakıtlara olan bağımlılığın azaltılması yönündeki politikalar, otomotiv sektörünü radikal biçimde dönüştürmüştür; bu

dönüşümün merkezinde elektrikli araçlar yer almıştır. Bu araçların yaygınlaşması, sadece enerji dönüşümünü değil, aynı zamanda taşıt bileşenlerinin tasarımı, üretimi ve fonksiyonlarının yeniden ele alınmasını zorunlu kılmıştır. Elektrikli araçlar için batarya sistemleri, güç elektroniği donanımları ve elektrik motoru gibi hassas bileşenlerin çoğunlukla aracın alt kısmına yerleştirilmesi, bu bölgelerin çevresel etkilere ve mekanik zorlamalara karşı korunmasını kritik hale getirmiştir. Bu noktada, araçların alt kısmında yer alan plastik koruyucu kapaklar, hem aracın güvenliği hem de performansı açısından çok işlevli ve önemli bir rol üstlenmektedir.

Yapısal optimizasyon, bir bileşen, sistem veya yapının malzeme dağılımı ve konfigürasyonunu en uygun şekilde belirleyerek yapısal performansın en üst düzeye çıkarılmasını amaçlayan bir mühendislik yaklaşımıdır. Bu süreçte, üretim ve maliyet kısıtlamaları dikkate alınarak dayanım ve rijitlik gereksinimlerini karşılayan en hafif yapının elde edilmesi hedeflenmektedir. Mühendisler, matematiksel modeller ve hesaplamalı yöntemlerden yararlanarak performans kriterlerine uygun en verimli geometrik çözümü ortaya koymaktadır. Otomotiv, havacılık ve inşaat gibi birçok sektörde kullanılan yapısal optimizasyon teknikleri, malzeme tüketimini azaltırken ürün performansını artırmakta ve yenilikçi tasarımların geliştirilmesine olanak sağlamaktadır. Bu kapsamda, boyut, şekil ve topoloji optimizasyonu olmak üzere üç temel yöntem ön plana çıkmaktadır. Özellikle topoloji optimizasyonu, belirlenen çalışma koşulları altında optimum malzeme dağılımını sağlarken yapının ağırlığını azaltmayı da amaçlamakta; geleneksel yöntemlerden farklı olarak daha serbest ve inovatif tasarım çözümleri sunarak yapısal verimliliği artırmaktadır.

Literatürde birçok araştırmacı çeşitli taşıt parçalarında topoloji optimizasyonu gerçekleştirerek farklı oranlarda hafifletme elde etmişlerdir [1], [2]. Jiang ve ark. (2022) taşıt

salıncak kolu için optimizasyon çalışması gerçekleştirmiş ve yaklaşık %38 hafifletme sağlamışlardır [3]. Albak (2019) fren pedal ağırlığını azaltma amacıyla yapısal optimizasyon çalışması yürütmüş ve yaklaşık %11 oranında hafifletme elde etmiştir [4]. Deshpande ve ark. (2021) park fren kolunda kompozit malzeme kullanarak yeni nesil bir modeli topoloji optimizasyonu ile elde etmişlerdir [5]. Dogan ve ark. traktör debriyajındaki baskı parçasının topoloji optimizasyonunu gerçekleştirmişlerdir [6]. Yüksel (2019) yapısal optimizasyon türleri ile ilgili olarak bir derleme çalışma hazırlamıştır [7]. Karamert ve ark. (2022) ticari bir otobüs gövde yapısında topoloji optimizasyonu ile profil örgü yapısını değiştirerek %9 oranında bir hafifletme elde etmiştir. Özcan ve ark. (2025) bir metrobüs gövdesinde gerçekleştirdikleri tasarım optimizasyonları ve malzeme değişiklikleri ile %14 oranında bir hafifletme elde etmişlerdir [8].

Bu çalışmada elektrikli araçların alt kısmında yer alan plastik kapağın sonlu elemanlar analizleri ile mevcut durumdaki performansı incelenmiş ve hafifletme amacı ile topoloji optimizasyonu gerçekleştirilmiştir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

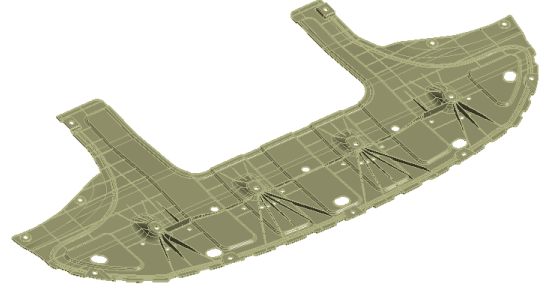
Günümüzde elektrikli araçlarda kullanılan plastik alt koruyucu kapaklar, pek çok görevi aynı anda yerine getirmek zorundadır. Bu kapaklar öncelikle aracın altındaki hava akışını düzenleyerek aerodinamik direnci azaltmakta, böylece enerji tüketimini düşürmekte ve menzil kapasitesini artırmaktadır. Ayrıca yol koşullarına bağlı olarak karşılaşılan su, çamur, taş ve çeşitli yol enkazlarının aracın altındaki bileşenlere zarar vermesini önlemekte; batarya paketleri, yüksek gerilim kabloları ve motor gibi sistemlerin daha uzun ömürlü ve güvenli bir şekilde çalışmasına katkı sunmaktadır. Bunlara ek olarak, titreşim ve yol gürültüsünü sönmüleyerek iç kabin konforuna da olumlu katkıda bulunurlar. Örnek bir koruyucu kapak görüntüsü Şekil 1’de verilmiştir.

Şekil1.Örnek bir koruyucu kapak görseli



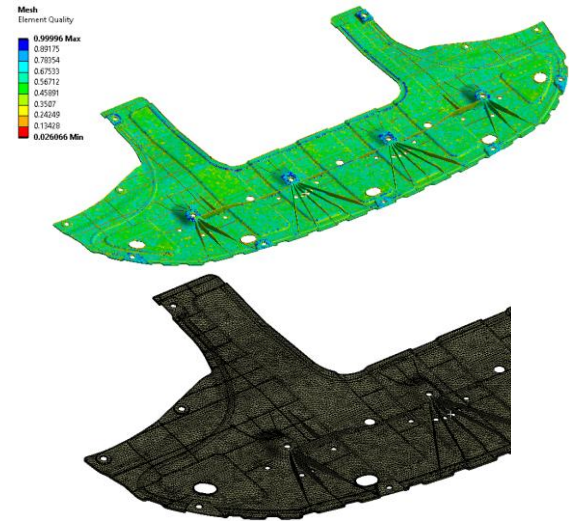
Söz konusu kapakların kullanım şartlarında maruz kaldığı en önemli yüklerden biri iç kısmında yayılı yük olarak etki eden farklı türlerdeki kalıntıların birikmesidir. Bu çalışmada da benzer bir senaryo altında kapağın dayanımı analiz edilmiştir. Öncelikle koruyucu plastik kapağın CAD modeli oluşturulmuştur (Şekil 2).

Şekil2. Analiz edilen kapağın CAD görüntüsü



Çalışma kapsamında öncelikle ANSYS Workbench yazılımı üzerinden ağ yapısı oluşturulmuştur. Oluşturulan ağ yapısında genellikle hex eleman tipi tercih edilmiş ancak geometrinin gerektirdiği bölgelerde farklı ağ yapıları da tercih edilmiştir. Kurulan model 446993 nod ve 223695 elemandan oluşmuştur. Kullanılan elemanların kalitesi ve ağ yapısına örnek olarak bir bölgenin görüntüsü Şekil 3’te verilmiştir.

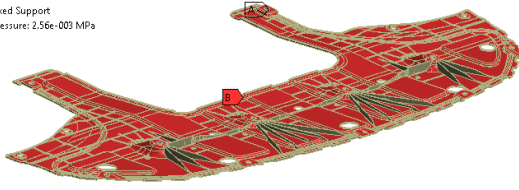
Şekil3. Plastik alt kapak ağ yapısı



Yapılan analizdeki sınır şartlarında kapağın araç gövdesine bağlantı noktaları sabit mesnet olarak belirlenmiştir. Ayrıca kapağın tüm iç yüzeyine yayılı olarak basınç uygulanmıştır. Maruz kalınan basıncı oluşturabilmek için 1000 N’luk bir kuvvet belirlenmiştir (Şekil 4).

Şekil4. Sonlu elemanlar modeli sınır şartları görüntüsü

A: Static Structural
Static Structural
Time: 1 s
A: Fixed Support
B: Pressure: 2.56e-003 MPa



Koruyucu kapak malzemesi olarak PA66 (%30-33 cam elyaf) belirlenmiştir. Bu malzeme standart poliamidin cam elyaf ile takviye edilerek özelliklerinin iyileştirildiği bir mühendislik plastığıdır. Bu takviye sayesinde malzeme, yüksek sıcaklıklara karşı direnç kazanır ve zorlu koşullarda dahi boyutsal kararlılığını korur. Bu nitelikleri onu özellikle otomotiv ve endüstriyel uygulamalarda metal parçalara alternatif olarak ideal bir malzeme yapar.

Bu kadar çok işlevi yerine getirmesi gereken bir parçanın tasarım süreci, sadece geometrik uygunlukla sınırlı olmayıp yapısal dayanıklılık, darbe absorpsiyonu, ısı direnç, akustik sönümlenme ve aerodinamik gibi çok yönlü mühendislik parametrelerini aynı anda göz önünde bulundurmayı gerektirir. Bu noktada sonlu elemanlar analizi ve topoloji optimizasyonu, modern mühendislik yaklaşımları içerisinde vazgeçilmez araçlar olarak öne çıkmaktadır.

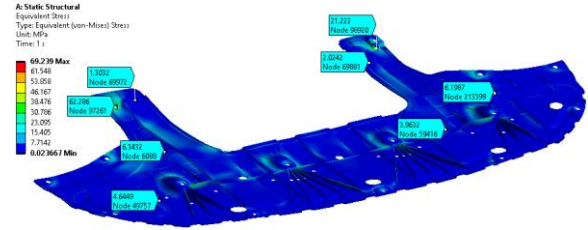
Parça tasarım sürecinde topoloji optimizasyonu, belirli sınır koşulları ve yükleme senaryoları altında yapısal bir parçanın mümkün olan en az malzeme ile istenen rijitlik, dayanım ve stabiliteyi sağlamasını hedeflemektedir. Bu yöntem, özellikle hafiflik ve yüksek performansın aynı anda beklendiği otomotiv parçaları için oldukça uygun bir optimizasyon yaklaşımıdır. Parçanın malzeme dağılımını yeniden düzenleyerek gereksiz kütleleri elimine eder ve yapısal performansı artırır. Elektrikli araçlarda ağırlığın doğrudan enerji tüketimi ve menzille ilişkili olması nedeniyle, topoloji optimizasyonunun katkısı sadece mekanik değil, aynı zamanda çevresel ve ekonomik boyutta da değerlidir. Ayrıca bu tür optimizasyon çalışmalarında üretim süreçleri, özellikle enjeksiyon kalıplama gibi plastik parça üretim teknikleri dikkate alınarak optimizasyon geometrileri üretilebilirlik açısından da gözden geçirilmelidir.

Çalışma kapsamında bu parçanın %40 daha hafifletilmesi için topoloji optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda araca bağlantı bölgeleri dışında kalan alanlarda optimizasyona konu edilmiştir.

3. BULGULAR VE SONUÇ

Araçlarda alt koruyucu olarak kullanılan plastik kapağın önce statik analizleri gerçekleştirilmiş ve eşdeğer gerilme ile toplam deformasyon miktarları incelenmiştir. Şekil 5'te parçanın üzerinde oluşan eşdeğer gerilme dağılımları verilmiştir.

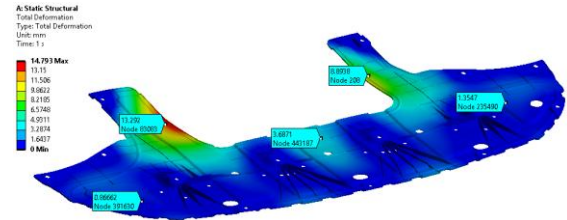
Şekil5. Plastik kapak üzerinde oluşan eşdeğer gerilme dağılımı



Elde edilen gerilme dağılımı incelendiğinde parçanın çok büyük bir kısmında 20 MPa değerinin altında bir eşdeğer gerilme olduğu tespit edilmiştir. En yüksek gerilme ise araca bağlantı noktalarında yaklaşık 69 MPa civarında gözlenmiştir.

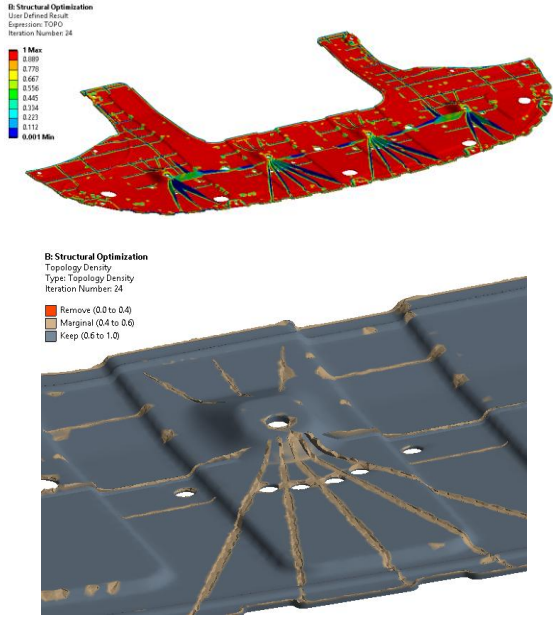
Parça üzerindeki toplam deformasyon miktarları da analiz edilmiştir (Şekil 6). Yapılan analiz sonucunda maksimum toplam deformasyonun yaklaşık 14 mm ile iç kısımdaki köşelerde olduğu gözlenmiştir.

Şekil6. Plastik kapak üzerinde oluşan toplam deformasyon dağılımı



Parçanın topoloji optimizasyonu da gerçekleştirilmiştir. Hedef fonksiyon olarak kütlenin %40 azaltılması belirlenmiş ve araca bağlantı yapılan bölgeleri haricinde kalan kısımlar optimizasyona dahil edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre plastik kapak üzerinde yer alan rib yapılarında azaltmalar yapılarak hafifletmenin mümkün olabileceği tespit edilmiştir (Şekil 7).

Şekil7. Topoloji optimizasyonu sonrasında elde edilen yapının görüntüsü



4. DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada elektrikli araçlarda kullanılan plastik alt koruyucu kapağın yapısal performansı sonlu elemanlar analizi ile incelenmiş ve elde edilen bulgular doğrultusunda topoloji optimizasyonu uygulanmıştır. Analizler, parçanın büyük bölümünde düşük gerilme seviyeleri olduğunu, en yüksek gerilmenin ise bağlantı bölgelerinde yoğunlaştığını göstermiştir. Ayrıca deformasyonların belirli noktalarda yoğunlaştığı tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, mevcut tasarımın genel olarak yeterli olmakla birlikte belirli bölgelerde iyileştirme potansiyeli taşıdığını ortaya koymuştur.

Gerçekleştirilen topoloji optimizasyonu, parçanın ağırlığında yaklaşık %40 oranında bir hafifletmenin mümkün olabileceğini göstermiştir. Bu hafifletme, elektrikli araçlarda enerji verimliliği ve menzil kapasitesine doğrudan katkı sağlamasının yanı sıra üretim maliyetlerinin azaltılması açısından da önemli avantajlar sunmaktadır. Bununla birlikte, optimizasyon sürecinde elde edilen tasarım geometrilerinin üretilebilirlik kriterleri dikkate alınarak değerlendirilmesi gerekmektedir.

Sonuç olarak, çalışma hem mühendislik yaklaşımı hem de pratik çıktıları açısından otomotiv sektöründe sürdürülebilir ve yenilikçi tasarımlar geliştirilmesine katkı sunmaktadır. İlerleyen aşamalarda, farklı yükleme senaryoları ve darbe analizlerinin de eklenmesiyle tasarımın güvenilirliği daha kapsamlı bir şekilde doğrulanabilir.

5. REFERANSLAR

- [1] Q. He, X. Li, W. Mao, X. Yang, and H. Wu, "Research on Vehicle Frame Optimization Methods Based on the Combination of Size Optimization and Topology Optimization," *World Electr. Veh. J.*, vol. 15, no. 3, 2024, doi: 10.3390/wevj15030107.
- [2] S. C. Anand, F. Mielke, D. Heidrich, and X. Fang, "Optimization, Design, and Manufacturing of New Steel-FRP Automotive Fuel Cell Medium Pressure Plate Using Compression Molding," *Vehicles*, vol. 6, no. 2, pp. 850–873, 2024, doi: 10.3390/vehicles6020041.
- [3] R. Jiang, Z. Jin, S. Ci, D. Liu, and H. Sun, "Reliability-based multilevel optimization of carbon fiber-reinforced plastic control arm," *Struct. Multidiscip. Optim.*, vol. 65, no. 11, pp. 1–15, 2022, doi: 10.1007/s00158-022-03429-0.
- [4] E. İ. ALBAK, "Optimum Design Of Brake Pedal Using Topology Optimization Method Intended For Weight Reduction On The Formula SAE Car," *Uluslararası Muhendis. Arastirma ve Gelistirme Derg.*, pp. 328–334, 2019, doi: 10.29137/umagd.467057.
- [5] C. P. Deshpande, A. Badadhe, and S. Khan, "Design, Analysis and optimization of Hand Brake Lever," *Int. J. Eng. Sci.*, vol. 14, no. 1, 2021, doi: 10.36224/ijes.140105.
- [6] O. Dogan, F. Karpas, C. Yuce, N. Kaya, N. Yavuz, and H. Sen, "A novel design procedure for tractor clutch fingers by using optimization and response surface methods," *J. Mech. Sci. Technol.*, vol. 30, no. 6, pp. 2615–2625, 2016, doi: 10.1007/s12206-016-0522-x.
- [7] O. YUKSEL, "an Overview on Topology Optimization Methods Employed in Structural Engineering," *Kırklareli Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilim. Derg.*, vol. 5, no. 2, pp. 159–175, 2019, doi: 10.34186/klujes.606666.
- [8] A. Özcan, İ. Yönel, and C. Yuce, "Lightweight design and structural analysis of a Bi-articulated bus: Experimental measurements and FEM validation," *Eng. Sci. Technol. an Int. J.*, vol. 70, no. July, 2025, doi: 10.1016/j.jestch.2025.102169.

Benzinli Enjektör Sızdırmazlık Bölgesinde Meydana Gelen Parçalı Aşınmanın Sızdırmazlık İşlevini Bozması Üzerine Kök Neden Tespiti

Arzu Minareci¹

¹ Bosch Sanayi ve Ticaret A.Ş., Yeşil Cadde, No:15 TÜRKİYE
Tel: +90 (224)219-3804 E-Posta : arzu.onayli@tr.bosch.com

ÖZET

Düşük emisyonlu motor tasarımı günümüz otomotiv teknolojisinin en önemli çevre hedeflerinden biridir. Bu tasarıma etki eden bileşenlerden biri olan benzinli enjektörün başlıca üç işlevi yerine getirmesi gerekir. Bu işlevler;
- Belli devir, sıcaklık ve basınç altında; belirli püskürtme süresinde, hedeflenen miktardaki yakıtı püskürtmek,
- Yanma performansını artırmak üzere uygun atomizasyonu sağlamak,
- Enjektör kapalı konumdayken, yakıt sızıntısı oluşturmamaktır.

Ayrıca tüm bu işlevleri yerine getirirken enjektör, belirlenen ömrü boyunca bu koşulları sürekli olarak talep edilen sınırlar içinde tutacak kadar dayanıklı olmak durumundadır.

Bu çalışmanın çıkış amacı, dayanım problemlerine bağlı olarak geliştirme testlerinden aldığımız hatalı parça geri dönüşlerinin kök nedenlerinin belirlenmesidir. Sadece belirli motor tiplerinde karşılaşılan bu hata, enjektörün yakıt sızdırmazlığını sağlamakla görevli meme iğne ve gövde temas (oturma) yüzeylerinde, homojen olmayan aşınma (Parçalı aşınma) ve sonucunda meydana gelen yakıt sızıntısıdır. Geliştirme testlerinde görülen bu problem, ürün üzerinde bilgi birikimi ve dolayısıyla ürün kalitesini iyileştirme fırsatı yaratmıştır.

Geliştirme testlerinde kullanılan enjektörlerin fonksiyonel anlamda incelenmesinin yanında aşınma davranışının incelenmesi amacı ile alt parçaların yüzey taraması, malzemenin kimyasal bileşiminin belirlenmesi, sertlik ölçümleri gibi farklı detay analizler yapılmıştır.

Ayrıca, geliştirme testlerinde kullanılan girdiler temel alınarak, hatanın oluşum nedeninin belirlenmesine yönelik bir simülasyon geliştirilmiştir.

Yapılan çalışmalar sonucunda ise, ürünün sızdırmazlık fonksiyonunu değerlendirip gerekirse iyileştirerek, neticesinde de müşterilerimize ve pazara çok daha kaliteli ürünler sunabilmek hedeflenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Benzinli Enjektör, Sızdırmazlık Fonksiyonu, Parçalı Aşınma, Yakıt Sızıntısı, Simülasyon, Yüzey Taraması, Malzeme Analizi

1. GİRİŞ

1.1. Yüksek Basıncılı Benzinli Enjektör

Püskürtme odaklı yanma sistemleri günümüzde yakıt tüketimini ve CO2 emisyonlarını daha da azaltmak için anahtar teknoloji durumundadır. Yüksek basınçlı benzinli enjektör bu teknolojinin kullanımını mümkün kılmaktadır. Özellikle motorun ilk çalıştırılması sırasındaki (soğuk başlatma) emisyonun azaltılması için bu yanma teknolojisi önem taşımaktadır. Aynı zamanda motor gücünü arttırarak sürüşü daha zevkli hale getirmeyi de mümkün kılar. Püskürtme odaklı yanma sisteminin yapısal temelini oluşturan Yüksek basınçlı benzinli enjektör motorda merkezi olarak konumlanmıştır. Bu enjektör piezo elemanı tarafından tetiklenen ve dışa doğru açılarak püskürtmeyi sağlayan A-Meme'den oluşur. Merkezi olarak konumlanmış enjektör ve çoklu püskürtmeyi mümkün kılan piezo elemanı sayesinde yanma odası duvarlarının ve piston yüzeyinin ıslanması engellenirken, partikül emisyonu aynı segmentteki enjektörlere göre daha azdır.



Şekil 1. Yüksek Basınçlı Benzinli Enjektör

1.1.1. Enjektör Alt Parçası - İğne

İğne grubunun temel gövde parçasını oluşturur. Meme gövdesine ve burca yataklama yapar. Piezoaktörün uzamasına bağlı olarak dışa doğru açılarak yakıtın yanma odasına püskürtülmesini sağlar.



Şekil 2. İğne

1.1.2. Enjektör Alt Parçası - Meme Gövdesi

İğnenin yakıtın püskürtüldüğü taraftaki ucunun oturduğu parçadır. İğnenin iki yataklamasından ikisi meme gövdesindedir. İğne ve meme gövdesi arasındaki bölge, enjektörün yakıt püskürtme performansını doğrudan etkiler.

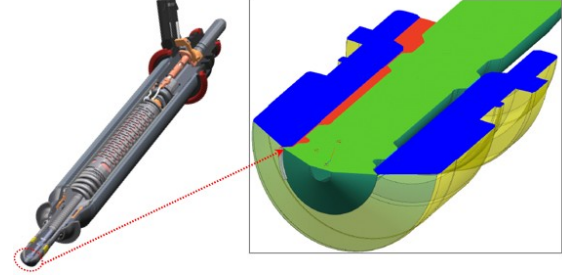


Şekil 3. Meme Gövdesi

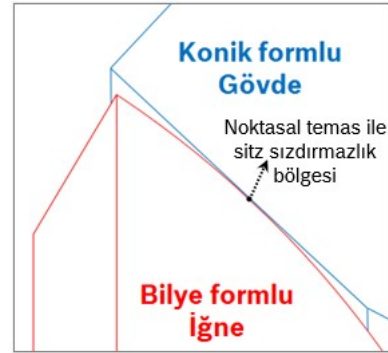
1.2. Oturma yüzeyi Sızdırmazlık Bölgesi

Yüksek basınçlı benzinli enjektörde konik olarak tasarlanmış gövde ve bilyeye benzer şekilde yuvarlak olarak tasarlanmış iğne, noktasal olarak 360° boyunca birbirine temas ederler. Noktasal temasın olduğu bölge; iğne-gövde oturma yüzeyi ya da oturma yüzeyi sızdırmazlık bölgesi (Şekil 4. ve Şekil 5.) olarak adlandırılır. Enjektör sızdırmazlığının sağlandığı bölge burasıdır. Oturma yüzeyi sızdırması, enjektör elektrikselsel olarak tetiklenmezken yani kapalı konumdayken iğne ve

gövde oturma yüzeyi (Oturma yüzeyi bölgesi) arasındaki mikron bazlı boşluklardan dışarı doğru oluşan yakıt sızıntısı olarak tanımlanır. İğne ve gövde oturma yüzeyi yuvarlaklık ve salgı problemleri, oturma yüzeyi sızdırma bölgesindeki partiküller, iğne ve gövde oturma yüzeyindeki vuruş veya hasarlar enjektörün oturma yüzeyi bölgesinden sızdırmasına neden olur, ki bu enjektör performansı açısından istenmeyen bir durumdur.



Şekil 4. Oturma yüzeyi sızdırmazlık bölgesi



Şekil 5. Noktasal temas ile oturma yüzeyi sızdırmazlık bölgesi

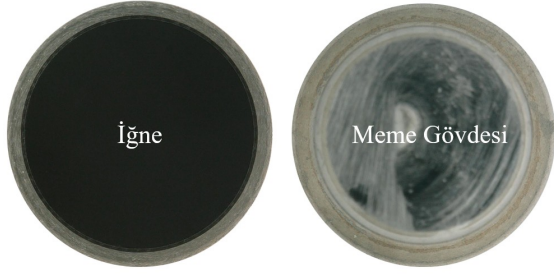
1.2.1. Oturma yüzeyi Sızdırmazlık Ölçümü

İzin verilen maksimum sızdırma değeri mm^3/min cinsinden ölçülmektedir. Pnömatik oturma yüzeyi sızdırma değerleri yüksek olan parçalar hidrolik sızdırmazlık ölçümüne tabi tutulur. İşlem öncesi enjektör n-Heptan ile doldurulur. Sızdırmazlık ölçümü boyunca enjektöre yüksek basınçlı azot gazı uygulanır ancak enjektör tetiklenmez. Aynı zamanda ortama He ve H₂ verilerek ortam sıcaklığı yükseltilir. Yanma gerçekleşir. Yanma sonucu HC-Bileşenleri H₂ alevinde iyonize olur. Oluşan iyon akımı konsantrasyon ile orantılıdır. Akım değişimden, püskürtme bölgesinden kaçarak ortama sızan akışkan miktarı tespit edilir.

2. İĞNE VE MEME GÖVDESİNDE TESPİT EDİLEN PARÇALI AŞINMA

Yüksek basınçlı benzinli enjektörlerde, iğne ile meme gövdesi 360° boyunca noktasal temas hâlinde olduğundan, enjektörün çalışması sırasında

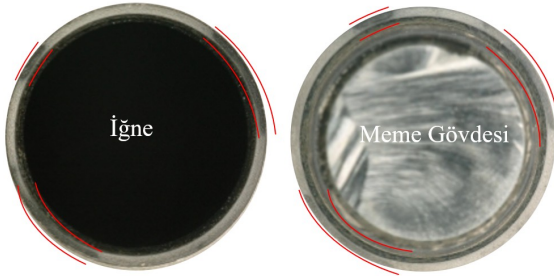
bu temas bölgelerinde (Oturma yüzeyi sızdırmazlık bölgesi) zamanla aşınma meydana gelmesi beklenen bir durumdur (Şekil 6.).



Şekil 6. Oturma yüzeyi sızdırmazlık bölgesinde meydana gelen ve beklenen aşınma tipi

Ancak, bu iki alt parçadaki aşınma 360° boyunca sürekli değil de parçalı şekilde oluşursa, bu aşınma türüne parçalı aşınma denir.

Şekil 7’de kırmızı ile işaretlenen bölgeler aşınma alanlarını göstermektedir. Hem iğne hem de meme gövdesinde bu kırmızı işaretli bölgeler incelendiğinde, aşınma davranışlarının parçalı bir şekilde gerçekleştiği görülmektedir. Parçalı aşınma, oturma yüzeyi bölgesinde açıklık oluşumuna neden olduğundan, enjektörde sızdırmaya yol açmaktadır.



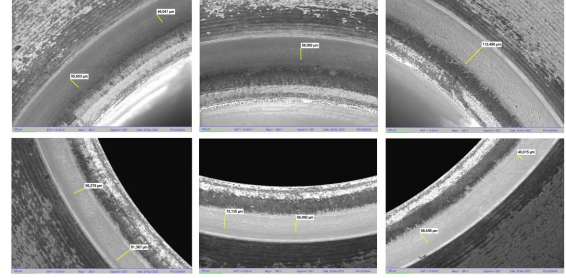
Şekil 7. Oturma yüzeyi sızdırmazlık bölgesinde meydana gelen parçalı aşınma

2.1.1. Aşınma Davranışının Elektron Mikroskobu ile İncelenmesi

İğne ve Meme Gövdesi temas yüzeylerindeki aşınma davranışının tespiti ve aşınma genişliklerinin net olarak belirlenmesi için bu alt parçalar elektron mikroskobu ile incelenmiştir.

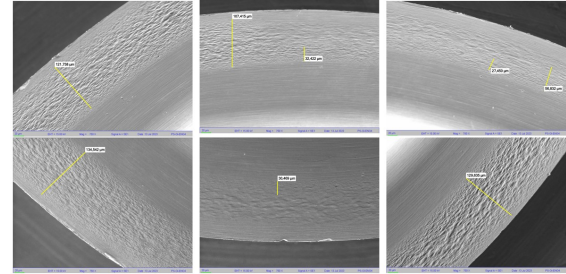
Elektron mikroskobu, geleneksel optik mikroskopların çözünürlük sınırlarının ötesinde, çok yüksek büyütme ve detay çözünürlüğü sağlayan bir görüntüleme cihazıdır. Prensipte olarak, numune üzerine gönderilen elektron demetlerinin numune ile etkileşimi sonucu ortaya çıkan sinyaller toplanarak görüntü oluşturulur. Elektronların dalga boyunun çok kısa olması, elektron mikroskoplarının nanometre ölçeğinde ayrıntıları gözlemlemesine olanak tanır (Williams ve Carter, 2009).[1]

Meme gövdesi, elektron mikroskobu altında 750 büyütmede incelendiğinde, oturma yüzeyi sızdırmazlık bölgesine karşılık gelen alandaki aşınma genişliklerinin homojen olmadığı ve çeşitlilik gösterdiği gözlemlenmiştir. Örneğin, Şekil 8’de örnek olarak sunulan meme gövdesinde minimum aşınma derinliği 40,015µm iken, maksimum aşınma derinliği 112,490µm olarak tespit edilmiştir.



Şekil 8. Meme Gövdesinin Elektron Mikroskobundaki Görüntüsü

İğne parçası elektron mikroskobu altında incelendiğinde, oturma yüzeyi sızdırmazlık bölgesine karşılık gelen alandaki aşınma genişliklerinin homojen olmadığı ve çeşitlilik gösterdiği gözlemlenmiştir. Örneğin, Şekil 9’da örnek olarak sunulan iğne parçasında minimum aşınma derinliği 27,45 µm iken, maksimum aşınma derinliği 134,542µm olarak tespit edilmiştir.

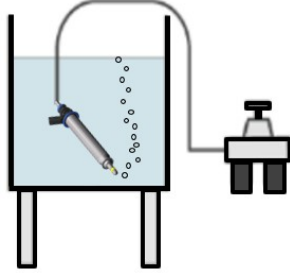


Şekil 9. İğnenin Elektron Mikroskobundaki Görüntüsü

2.1.2. Parçalı Aşınmanın Sızdırma İle İlişkisinin Tespit Edilmesi

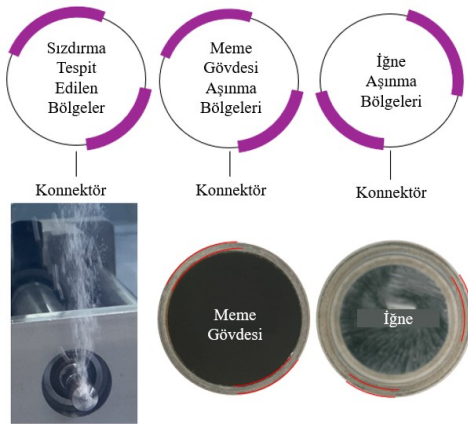
Teorik olarak, aşınma davranışının 360° boyunca sürekli değil parçalı şekilde gerçekleşmesi, oturma yüzeyi sızdırmazlık bölgesinde açıklık oluşumuna ve dolayısıyla sızdırmaya neden olmaktadır. Bu hipotezi doğrulamak amacıyla, enjektörlerin iğne ve meme gövdesi parçaları, enjektörün konnektör pozisyonuna göre işaretlenmiş ve ardından enjektörler kabarcık sızıntı testine tabi tutulmuştur. Kabarcık sızıntı testi, yüksek basınçlı benzinli enjektörlerin sızdırmazlığını değerlendirmek için kullanılan bir yöntemdir. Testte, su dolu bir kaba daldırılan enjektörün basınç altında kabarcık çıkarıp çıkarmadığı gözlemlenir; kabarcık oluşumu enjektörde sızıntı olduğunu gösterir.

Parçalı aşınmanın sızdırmaya sebep olduğu hipotezini doğrulamak amacıyla toplamda 10 adet enjektör üzerinde deneyler gerçekleştirilmiştir. Yüksek basınçlı benzinli enjektörler, Şekil 10'da gösterildiği üzere test sistemine bağlanmış ve hava basıncı, 0 bar'dan enjektörün çalışma basıncı olan 200 bar'a kadar kademeli olarak artırılarak sızdırma bölgeleri incelenmiştir.



Şekil 10. Kabarcık sızıntı testi sistemi

Yapılan deneysel test sonuçları, yüksek basınçlı benzinli enjektörün oturma yüzeyi sızdırmazlık bölgesinde gözlemlenen sızıntı alanlarının, meme gövdesi ve iğnede tespit edilen aşınma bölgeleriyle doğrudan örtüştüğünü göstermektedir. (Şekil 11.) Sonuç olarak, gerçekleştirilen test hipotezi doğrulanmış ve parçalı aşınmanın enjektörde sızdırmaya yol açtığını ortaya koymuştur.



Şekil 11. Sızdırma bölgeleri ve aşınma bölgelerinin eşleşmesi

3. BENZİNLİ ENJEKTÖRÜN TEMEL FONKSİYONLARI

3.1. Püskürtülen Yakıt Miktarı

Enjektörün açılmasıyla, tetikleme sona erip püskürtmenin bittiği ana kadar enjektörden çıkan dinamik yakıt debisidir. Birimi mg/Hub olarak ifade edilebilir. Bu değer müşteri talebi doğrultusunda belirlenir. Müşterinin istediği motor performansına göre belirlenen t_i (injection time = tetikleme süresi) noktalarında yanma odasına

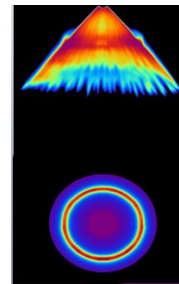
püskürtülen yakıt miktarı olan q_{dyn} motor ve yanma verimini doğrudan etkileyen bir parametredir. Püskürtülen yakıt miktarının ölçülmesi için enjektör belli bir baskı kuvveti ile sıkıştırılır ve yakıt olarak 20MPa basınca sahip n-Heptan kullanılmaktadır. Enjektöre akım verilmesi neticesinde Piezo Aktörün boy uzaması doğrudan iğneye iletilir, iğne açılır, yakıt dışarı püskürtülür. Püskürtülen test yakıtı miktarı Coriolis metodu ile ölçülür.

Benzinli enjektörlerde yakıt akış debisinin hassas olarak ölçülmesi, enjeksiyon performansının ve motor verimliliğinin değerlendirilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Coriolis kütle akış ölçerleri, bu amaçla yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemde, enjektörden çıkan yakıt boru boyunca geçerken boru yapısında meydana gelen küçük titreşimler ölçülür; bu titreşimler, akışkanın kütlelerine ve hızına bağlı olarak değişir. Coriolis sensörleri hem anlık kütle akışını hem de toplam akışı yüksek doğrulukla belirleyebilir (White, 2016). Bu yöntem, özellikle yakıtın yoğunluğu ve viskozitesindeki değişimlerden etkilenmeden doğrudan kütle debisini ölçebilmesi nedeniyle, benzinli enjektörlerin performans karakterizasyonunda tercih edilmektedir.[2]

Parçalı aşınma tespit edilen enjektörlerin püskürtülen yakıt miktarları nominalin altında gelmektedir. Bu durum, enjeksiyon sisteminin verimliliğini ve motor performansını doğrudan etkileyen önemli bir sorundur. Enjektörlerin nominal püskürtme miktarlarının altında yakıt püskürtmesi, motorun güç üretim kapasitesini düşürürken, yanma verimliliğini de olumsuz yönde etkiler. [3]

3.2. Püskürtme Bulutunun Açısı ve Formu

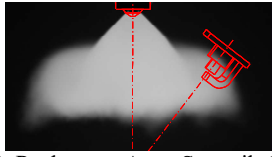
A-meme püskürtme odaklı yanma sisteminin yapısal temelini oluşturur. Benzinli enjektörün meme tipi olan A-memenin püskürtme bulutu Şekil 12.'de gösterilmiştir.



Şekil 12. A-Meme püskürtme bulutu

Püskürtme Açısı (α -Alpha), enjektör püskürtme bulutunun açısıdır. Bu değer müşteri talebi doğrultusunda belirlenir. Müşterinin istediği motor

performansına göre belirlenen Alpha açısı yanma odasına püskürtülen yakıt bulutunun boyunu ve formunu etkiler. Aynı zamanda buji, piston yüzeyi ve yanma odası duvarlarının ıslanmamasında bu açının etkisi olduğundan, yanma verimi Alpha açısından doğrudan etkilendir. Enjektörün püskürtme bölgesinde 360° boyunca aynı püskürtme açısı ve geometrisine sahip olması, bujinin önünde ideal bulutun oluşturulması için kritik önem taşır. Püskürtme açısının ölçümü için 20MPa basınçlı n-Heptan yakıt olarak kullanılarak, enjektör ti süresi boyunca tetiklenir. Tetikleme süresinin içerisinde ışık kaynağı tarafından ortam aydınlatılır ve ışıklandırma ile senkronize olan kamera püskürtme fotoğrafını çeker.



Şekil 13. Püskürtme Açısı Şematik Gösterim

Sızdırma görülen benzinli enjektörlerde, püskürtülen yakıtın spray davranışı belirgin şekilde değişmektedir. Enjektör tam olarak kapanmadığında, enjeksiyon basıncı düşer ve püskürtme menzili kısalmır; bu durum, yakıtın motor yanma odasında simetrik ve homojen bir şekilde dağılmamasına yol açar. Spray konisi asimetrik hâle gelir ve damla boyutu dağılımı bozulur, bu da atomizasyon kalitesini olumsuz etkiler. Sonuç olarak, motorun yanma verimliliği düşer ve CO, HC gibi emisyonlarda artış gözlemlenir. [4] Bu nedenle, sızdırma sorunu, enjektör performansının ve motor verimliliğinin kritik bir göstergesidir.

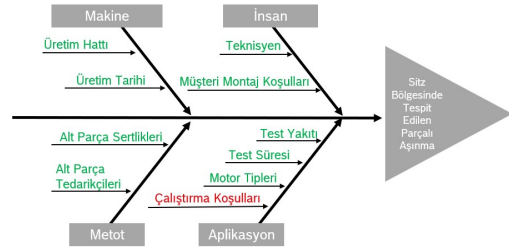
4. PARÇALI AŞINMA DAVRANIŞININ KÖK NEDEN ANALİZİ KAPSAMINDA YAPILAN ARAŞTIRMALAR

Parçalı aşınma davranışının kök neden analizi kapsamında hem müşteri geliştirme testlerinde hem de Bosch geliştirme testlerinde kullanılmış enjektörler detaylı olarak incelenmiştir.

4.1. Balık Kılıcı (Ishikawa Analizi)

Analiz sürecinde, olası nedenlerin sistematik bir biçimde değerlendirilmesi ve bütünsel bir çerçevede ele alınabilmesi için Balık Kılıcı (Ishikawa) Diyagramı yöntemi tercih edilmiştir. Bu yöntem aracılığıyla, farklı etki alanlarına ait alt parametreler gruplandırılmış ve yapısal bir şekilde sınıflandırılmıştır. Çalışma kapsamında özellikle Makine, İnsan, Metot ve Aplikasyon faktörleri altında yer alan parametreler ayrı ayrı değerlendirilmiş; böylece

parçalı aşınma davranışını etkileyebilecek temel unsurların neden-sonuç ilişkisi içinde daha net biçimde ortaya konulması amaçlanmıştır.

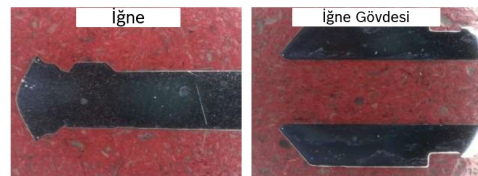


Şekil 14. Balık Kılıcı (Ishikawa) Diyagramı

Balık kılıcı diyagramının 'İnsan' alt dalında müşteri montaj koşulları ve teknisyenlere ilişkin alt parametreler incelenmiştir. Montaj koşullarının tanımlı spesifikasyonlara uygun olarak gerçekleştirildiği ve herhangi bir anormalliğin bulunmadığı tespit edilmiştir. Bununla birlikte montaj işlemlerinin, farklı eğitim geçmişlerine sahip teknisyenler tarafından yapıldığı görülmüştür. Dolayısıyla bu parametrelerin de parçalı aşınma üzerinde etkili olmadığı sonucuna varılmıştır.

Balık kılıcı diyagramının 'İnsan' alt dalında müşteri montaj koşulları ve teknisyenlere ilişkin alt parametreler incelenmiştir. Montaj koşullarının tanımlı spesifikasyonlara uygun olarak gerçekleştirildiği ve herhangi bir anormalliğin bulunmadığı tespit edilmiştir. Bununla birlikte montaj işlemlerinin, farklı eğitim geçmişlerine sahip teknisyenler tarafından yapıldığı görülmüştür. Dolayısıyla bu parametrelerin de parçalı aşınma üzerinde etkili olmadığı sonucuna varılmıştır.

Metot alt başlığı altında İğne ve İğne Gövdesi parçalarının tedarikçileri incelenmiş olup normal dağılım olduğu tespit edilmiştir. İncelenen enjektörlerden alınan örneklem kapsamında, Şekil 15'de gösterilen iğne ve iğne gövdesi parçalarından elde edilen kesitlerde sertlik analizleri gerçekleştirilmiştir. Malzeme sertliği, bir malzemenin kalıcı plastik deformasyona, özellikle girintiye, çizilmeye, aşınmaya veya başka bir cismin batmasına karşı gösterdiği direnç olarak tanımlanır. [4] Ancak parçalı aşınma görülen ve görülmeyen enjektörlere ait İğne ve İğne Gövdeleri alt parçalarının sertlik ölçüm değerleri karşılaştırdığında belirgin bir fark saptanmamıştır.



Şekil 15. İğne ve İğne Gövdeleri Kesitleri

Balık kılıcı diyagramının 'Aplikasyon' alt başlığı kapsamında, test yakıtı, test süresi ve motor tipleri alt parametreleri ayrıntılı olarak incelenmiştir. Yapılan analizler sonucunda bu parametrelerde

herhangi bir anormallik veya standart dışı uygulamaya rastlanmamıştır. Öte yandan, ‘Çalışma Koşulları’ alt başlığı altında gerçekleştirilen incelemelerde, parçalı aşınma gözlemlenen enjektörlerde tetikleme süresi (ti) değerlerinin tasarımı öngörülen süreden daha uzun uygulandığı tespit edilmiştir. Bu durum, enjektörlerde meydana gelen parçalı aşınmanın oluşumunda tetikleme süresinin önemli bir etken olabileceğini göstermektedir. Bulgular, çalışma koşullarının ve özellikle tetikleme süresi parametresinin enjektör performansı ve aşınma davranışı üzerindeki kritik rolünü vurgulamaktadır.

4.2. Simülasyon Çalışmaları

Parçalı aşınma davranışının kök neden analizi çalışmaları kapsamında enjektör AMESİM programında modellenmiştir. Yapılan bu modellemede tetiklenme süresi normalden fazla olarak belirtilmiştir.

Amesim, mekatronik sistemlerin 1D (bir boyutlu) simülasyonunu gerçekleştiren bir yazılım platformudur. Bu yazılım, mühendislerin ve tasarımcıların mekanik, elektriksel, termal, hidrolik ve pnömatik gibi farklı fiziksel alanlarda sistem modelleri oluşturmalarına, simüle etmesine ve analiz etmesine olanak tanır. Amesim, sistem mühendisliği disipliniinde, özellikle erken tasarım aşamalarında, fiziksel prototipler üretmeden önce sistem davranışlarını değerlendirmek için kullanılır. [5]

Yapılan simülasyon çalışmaları sonucunda, enjektör iğnesinin dinamik davranışları üzerinde sönümleyici yağın yeniden dolum mekanizmasının belirgin etkiler oluşturduğu görülmüştür. Özellikle bu mekanizma, iğne hareket seviyesinin azalmasına yol açmıştır. Bununla birlikte, tetikleme süresinin artması neticesinde hedeflenen püskürtme değerlerine ulaşamadığı tespit edilmiştir. Dolayısıyla, püskürtme karakteristiklerinde ortaya çıkan sapmalar, hem yakıt-hava karışımının homojenliğini hem de yanma verimliliğini olumsuz yönde etkileme potansiyeline sahiptir. Ayrıca analizlerde, silindirden kaynaklanan ısı etkileri nedeniyle iğne ucunda belirgin bir sıcaklık yükselmesi saptanmıştır. Bu termal yük, malzemenin uzun süreli dayanımını azaltmakta ve oturma yüzeyinde aşınma hızını artırmaktadır. Zamanla meydana gelen bu aşınma, oturma yüzeyinde yüzey bütünlüğünün bozulmasına ve enjektörde sızdırma problemlerinin ortaya çıkmasına sebep olmaktadır. Sonuç olarak, simülasyon bulguları, enjektör performansını sınırlayan temel mekanizmaları ortaya koymaktadır. Yüksek tetikleme süreleri, enjektörün püskürtme miktarını ve spray karakteristiğini doğrudan etkileyerek, iğne açılma dinamiklerinde hızlanmaya, ancak aşırı durumlarda atomizasyonun

bozulmasına, basınç dalgalanmalarına ve buna bağlı olarak yanma verimliliği ile emisyonlarda olumsuz sonuçlara yol açabilmektedir. [6]

4.3. Hatayı Tekrarlamak Amacıyla Gerçekleştirilen Enjektör Ömür Testi

Enjektörlerde tespit edilen arızaların tekrarlanabilirliğini ve bileşen dayanıklılığını değerlendirmek amacıyla ömür testi uygulanır. Test sırasında enjektörler belirli bir süre boyunca normal veya aşırı çalışma koşullarına tabi tutulur ve yakıt püskürtme performansı ile basınç değerleri sürekli olarak gözlemlenir. Bu yöntem, enjektörlerin nominal performansını doğrulamanın yanı sıra olası mekanik ve elektriksel arızaların öngörülmesine de olanak sağlar (IEC 61014, 2019). [7]

Bu çalışma kapsamında, enjektör ömür testlerinin gerçekleştirilmesi amacıyla seri üretimden toplam 16 adet benzinli enjektör seçilmiştir. Testler, farklı çalışma koşullarının enjektör performansı ve dayanıklılığı üzerindeki etkilerini incelemek için iki ayrı grupta yürütülmüştür. İlk grupta yer alan 8 enjektör, yüksek tetikleme süresi ve düşük çalışma basıncı altında test edilmiştir. Bu koşullar, özellikle enjektörün uzun süreli açma süresine ve düşük basınçta meydana gelebilecek performans değişimlerine karşı dayanıklılığını gözlemlemek amacıyla belirlenmiştir. İkinci gruptaki diğer 8 enjektör ise normal çalışma basıncında, ancak yüksek tetikleme süresi kullanılarak test edilmiştir. Bu yaklaşım, enjektörlerin nominal basınçta çalışma sırasında tetikleme süresine bağlı olarak oluşabilecek aşınma ve performans değişikliklerini değerlendirmeye olanak sağlamaktadır. Her iki test grubu boyunca, enjektörlerin püskürtme miktarları, basınç değerleri ve dinamik yanıtları sürekli olarak izlenmiş ve kayıt altına alınmıştır. Bu metodoloji, hem düşük basınç hem de normal basınç koşullarında yüksek tetikleme sürelerinin enjektör performansına etkilerini karşılaştırmalı olarak analiz etme imkânı sunmaktadır.

Yapılan ömür testi tamamlandıktan sonra, ilk grupta yer alan enjektörler detaylı bir şekilde incelenmiştir. İncelemeler sonucunda, bu gruptaki tüm enjektörlerde sızdırma problemleri tespit edilmiş ve ayrıca parçalı aşınma gözlemlenmiştir. Sızdırma ve parçalı aşınma enjektörlerin yakıt püskürtme doğruluğunu doğrudan etkileyerek motorun verimliliğini azaltma potansiyeline sahiptir, uzun süreli kullanımda ise performans düşüşünü hızlandırmaktadır. Bu bulgular, özellikle yüksek tetikleme süresi ve düşük basınç koşullarında enjektörlerin dayanıklılığının sınırlarını ortaya koymakta ve motor sisteminin güvenilir çalışması açısından kritik öneme sahip parametrelerin belirlenmesine katkı sağlamaktadır.

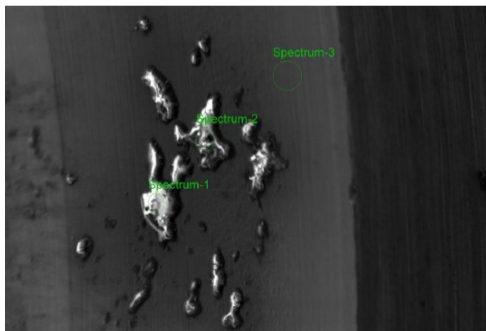
Ayrıca yapılan deneme testi sonrasında enjektörlerin iğne ve iğne gövdesi alt parçalarında kurum kalıntıları saptanmıştır.

Enjektör iğnesi, yakıtın silindire püskürtülmesinde kritik bir rol oynar ve püskürtme kalitesinin korunması motor verimliliği açısından büyük önem taşır. Ömür testi ve kullanım sırasında, iğne yüzeyinde yakıtın yanması sonucu oluşan kurum birikintileri gözlemlenebilir. Bu birikintiler, özellikle yüksek tetikleme süreleri, düşük basınç koşulları altında daha belirgin hale gelir. [8] Sonuç olarak, enjektörün nominal püskürtme miktarı azalır, yanma verimliliği düşer ve motor performansı olumsuz etkilenir. Düzenli bakım ve yakıt kalitesinin optimize edilmesi, iğne üzerindeki kurum birikimini azaltarak enjektörün uzun ömürlü ve verimli çalışmasını sağlar.

Şekil 16'da örnek olarak gösterilen iğne gövdesi REM görüntüsünde kalıntılar görülmektedir, bu kalıntılara EDX analizi yapılmıştır.

EDX (Energy Dispersive X-ray) analizi, malzemelerin yüzeyinde bulunan elementlerin kimyasal bileşimini belirlemek için kullanılan bir karakterizasyon yöntemidir. Bu teknik, genellikle taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile birlikte uygulanır.

Numune elektronlarla tarandığında, yüzeydeki atomlar karakteristik X-ışınları yayar; EDX detektörleri bu ışınların enerjilerini ölçerek hangi elementlerin bulunduğunu ve yaklaşık miktarlarını tespit eder. EDX analizi sayesinde, yüzeydeki oksit tabakaları, metal alaşım elementleri veya kurum birikintilerinin kimyasal yapısı belirlenebilir. Bu bilgiler, malzeme performansını, aşınma mekanizmalarını ve bakım gereksinimlerini anlamak açısından kritik öneme sahiptir. [9]



Şekil 16. İğne Gövdesi REM Görüntüsü

Tablo 1. EDX Sonuçları

	Spectrum-1	Spectrum-2	Spectrum-3
C	69,15	54,93	4,24
O	17,78	20,29	0
Na	8,98	14,42	0
Ca	3,27	6,55	0
Cr	0,46	0,64	22,93
K	0,37	0	0
Si	0	0,25	0,32
Fe	0	2,92	72,66
S	0	0	0,55

EDX analizi sonucunda elde edilen üç farklı spektrum, enjektör iğne gövdesi üzerindeki yüzey karakteristiklerini ve kurum birikintilerinin dağılımını ortaya koymaktadır. Spectrum-1, yüksek oranda karbon (%69,15) içermekte olup, yüzeyde yoğun bir organik karbon tabakası veya yakıt kaynaklı kurum birikintilerini temsil etmektedir. Bu spektrum ayrıca oksijen, sodyum ve kalsiyum elementlerini de içermekte olup, mineral veya çevresel kontaminasyonların yüzeyde birikmiş olabileceğini göstermektedir.

Spectrum-2, karbon oranının azalarak %54,93'e düşmesi ve metalik elementlerin (Fe %2,92, Si %0,25) ortaya çıkması ile hem karbon birikintisi hem de metal yüzeyin karışımını göstermektedir. Bu durum, enjektör iğne gövdesinin aşınmış veya kurumla kısmen kaplanmış bölgelerini temsil etmektedir.

Spectrum-3 ise karbon oranının %4,24 gibi düşük seviyelerde olması ve demir (%72,66) ile krom (%22,93) oranlarının yüksek olması ile metalik temel yüzeyi temsil etmektedir.

Genel olarak, EDX sonuçları enjektör iğne gövdesi üzerinde kurum birikintilerinin ve metal yüzeyin farklı bölgelerde dağıldığını ortaya koymaktadır. Yüzeydeki yüksek karbon oranları, uzun enjeksiyon süreleri ve düşük basınç koşullarında oluşan kurum birikimini doğrularken, metalik alaşım elementlerinin varlığı iğnenin temel malzemesini göstermektedir. Bu bulgular, enjektör performansını etkileyen mekanik ve termal etkileşimlerin anlaşılması ve bakım stratejilerinin belirlenmesi açısından kritik öneme sahiptir.

5. SONUÇLAR

İncelemeler sonucunda, iğne ve iğne gövdesi bileşenleri arasında parçalı aşınma tespit edilmiştir. Bu durum, özellikle iğne üzerinden iğne gövdesine iletilen yüksek kapanma kuvveti ve salınımların artmasına yol açmaktadır. Ayrıca, düşük basınç düşüşleri (buharlaşma etkisi) ve yanmaya enjeksiyon süresinin (ti) uzun olması, sönümlleme etkisinin azalmasına neden olarak sızdırmazlık yüzeylerinde kurum birikimini tetiklemektedir. Bu bulgular, enjektörün mekanik performansı ve yakıt püskürtme verimliliği üzerindeki olumsuz etkileri ortaya koymaktadır.

6. REFERANSLAR:

- [1] Williams, D. B., & Carter, C. B. (2009). *Transmission Electron Microscopy: A Textbook for Materials Science*. Springer.
- [2] White, F. M. (2016). *Fluid Mechanics* (8th ed.). McGraw-Hill Education.
- [3] Pielecha, I., Skowron, M., & Mazanek, A. (2018). *Evaluation of the injectors operational wear process based on optical fuel spray analysis*. *Eksplatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*, 20(1), 83–89.
- [4] John, V. *Hardness and its Measurement*. In: *Testing of Materials*. Springer. Bölüm “Hardness and its Measurement”
- [5] Medina, M., et al. (2021). *The effects of injector geometry and operating conditions on high-pressure gasoline spray characteristics*. *Fuel*, 287, 119625.
- [6] Vasiliu, D., Vasiliu, G. C., Rădulescu, A., & Cojocaru Greblea, T. (2017). Predicting the dynamic performance of the fuel injectors by numerical simulation
- [7] IEC 61014. (2019). *Reliability testing of electromechanical devices – Test methods for life and endurance*. International Electrotechnical Commission.
- [8] Heywood, J. B. (2018). *Internal Combustion Engine Fundamentals* (2nd ed.). McGraw-Hill Education.
- [9] Goldstein, J., Newbury, D. E., Joy, D. C., Lyman, C. E., Echlin, P., Lifshin, E., Sawyer, L., & Michael, J. R. (2018). *Scanning Electron Microscopy and X-ray Microanalysis* (4th ed.). Springer.

BENZİNLİ ENJEKTÖRDE BASINÇ ARTIŞINA BAĞLI KUVVET DEĞİŞİMLERİNİN STATİK YAKIT DEBİSİ, YAKIT TİPİ VE SICAKLIK PARAMETRELERİNE GÖRE İNCELENMESİ

Aydan Yalabaç

Bosch Sanayi ve Ticaret A.Ş. Yeşil Cadde, No:14 TÜRKİYE
E-Posta Aydan.Yalabac@tr.bosch.com

ÖZET

Bu çalışmada, farklı sistem basınçlarında kullanılan benzinli bir enjektörde, farklı sistem parametrelerinin kritik alt bileşenler üzerindeki kuvvet dağılımına etkilerini incelenmektedir. Bu doğrultuda, oluşturulan bir simülasyon sistem modeli ile enjektörün kritik alt bileşenlerine etki eden kuvvetler analiz edilmiştir. Gerçek çalışma koşullarını daha iyi temsil edebilmek adına, analizlerde statik yakıt debisi büyük ve küçük olmak üzere iki farklı senaryo kullanılmış; bunun yanı sıra farklı yakıt türleri ve çeşitli sıcaklık değerleri de modelin giriş parametreleri olarak tanımlanmıştır. Bu şekilde, alt parçaların iç kuvvet davranışları çeşitli koşullar altında karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

Elde edilen analiz sonuçları, benzinli enjektörlerin farklı çalışma koşulları altında kritik alt bileşenler üzerinde oluşan yüklerin anlaşılmasına katkı sağlamayı amaçlamaktadır. Bu çalışma, yapısal analizler öncesinde değişen sistem parametrelerinin etkilerini değerlendirmek ve tasarım sürecine veri temelli bir yaklaşım kazandırmak için gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Benzinli Enjektör, Dayanım, İç Kuvvet Analizi, Simülasyon

1.GİRİŞ

Enjektörler, içten yanmalı motorlarda yakıtı belirli bir basınç ve püskürtme karakteristiği ile silindire aktaran, yanma verimini ve emisyonları doğrudan etkileyen bileşenlerdir [1–3]. Yakıtın doğru şekilde iletilmesi; motorun performansı ve yakıt tüketimi üzerinde etkilidir. Çalışma sırasında enjektör; yüksek basınç altında, çok kısa zaman aralıklarında tekrarlanan açma-kapama hareketleriyle çalışmakta ve aynı anda hem akışkan kaynaklı kuvvetlere hem de yüksek sıcaklık ve mekanik yüklere maruz kalmaktadır. Özellikle doğrudan enjeksiyonlu (GDI) benzinli motor teknolojilerinde yakıt

püskürtme basınçlarının oldukça yüksek değerlere ulaşması, enjektör alt bileşenlerinin dayanım gereksinimlerini artırmaktadır. Bu nedenle, enjektör tasarımlarında; çalışma basıncı, yakıtın türü ve sistem sıcaklığı gibi parametrelerin alt bileşenler üzerindeki kuvvet dağılımına etkilerinin detaylı analiz edilmesi kritiktir. Aksi halde, bu bileşenlerde zamanla yorulma, aşınma veya deformasyon gibi dayanım problemleri ortaya çıkabilmektedir.

2.YÖNTEM

Mevcut tasarım varyantlarına göre kritik alt parçalar belirlenmiştir. Bu kritik alt bileşenler şunlardır: İğne oturma bölgesi, Durdurma Halkası, Durdurma Hültesi ve İç Kutup. Belirlenen kritik alt bileşenlerine etki eden kuvvetler farklı çalışma basınçları, farklı yakıt ve sıcaklık etkileri altında AMESim Simulasyon uygulaması kullanılarak analiz edilmiştir.

AMESim, çok alanlı sistemlerin davranışlarını modellemek ve simüle etmek için geliştirilmiş bir mühendislik yazılımıdır. Literatürde AMESim'in, yakıt enjeksiyon sistemleri, hibrit ve elektrikli araç güç aktarma organları, süspansiyon ve fren sistemleri gibi otomotiv uygulamalarında yaygın şekilde kullanıldığı görülmektedir [4].

Enjektörün gerçek çalışma koşullarını daha iyi temsil edebilmek adına, AMESim'de yapılan analizlerde statik yakıt debisi büyük ve küçük olmak üzere iki farklı senaryo kullanılmıştır.

Statik yakıt debisi enjektör tamamen açık durumda iken enjektörde iğnenin oturduğu ve sızdırmazlığı sağlayan bölgeden geçen yakıt debisidir. Bu değer enjektör tipine

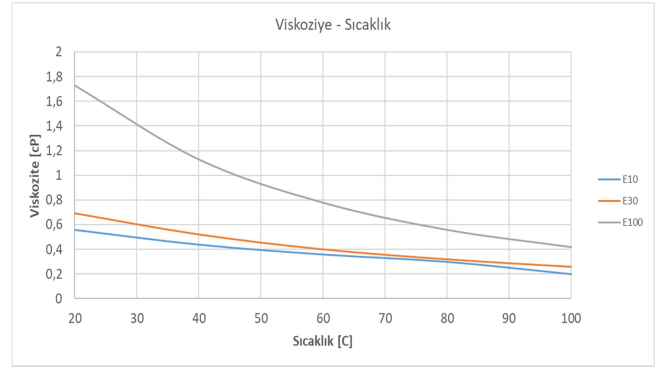
bağılı olarak değişiklik göstermektedir. Analizde maksimum ve minimum statik yakıt debisi parametreleri kullanılmıştır.

Enjektör tasarımları çalışma basınçlarına göre farklılık göstermektedir. Çalışmada 200 Bar ve 250 Bar çalışma basıncı baz alınmıştır.

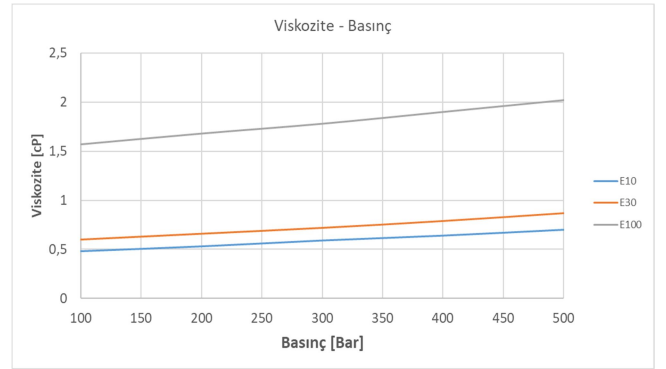
Yakıt sıcaklığı, yakıt deposundan enjektöre kadar uzanan yakıt hattı boyunca maruz kaldığı değişken termal koşullar sonucunda yakıtı ulaştığı sıcaklık değeridir. Bu sıcaklık değeri yakıt viskozitesini etkilediğinden enjektör performans ve dayanımında kritik rol oynamaktadır. İç kuvvet analizlerinde 20 °C ve 75 °C baz alınmıştır.

Yakıt türü, enjektör performansını ve iç kuvvet dağılımını doğrudan etkileyen önemli bir parametredir. Etanol–benzin karışımlarının yakıt özellikleri, özellikle başta yoğunluk, viskozite, buharlaşma ısısı ve alt ısı değer olmak üzere saf benzinden farklıdır [5]. Bu nedenle farklı etanol oranları ile yapılan analizler, enjektörün çalışma davranışının anlaşılması açısından kritik öneme sahiptir. Bu çalışmada E100 (%100 etanol), E30 (%30 etanol + %70 benzin) ve E10 (%10 etanol + %90 benzin) kullanılarak yapılan simülasyonlar üzerinden, yakıt tipinin enjektör içi kuvvet dağılımına etkileri incelenmiştir.

AMESim simülasyonunda yakıt ve sıcaklık etkisinin daha net görülebilmesi amacıyla yakıtların viskozite değişimleri sıcaklık ve basınç değişken koşulları altında incelenmiştir. Analiz sonuçları Şekil 1 ve Şekil 2 de sunulmuştur. Sıcaklık yükseldikçe her üç yakıt için de viskozite azalmaktadır. Etanol oranı arttığında ise viskozite yükselmektedir bu nedenle E100 yakıtı daha yüksek viskoziteye sahip olmaktadır. Simülasyon çıktılarından da görüldüğü üzere, E100 yakıtında sıcaklığın artmasıyla akışkanlık kayda değer biçimde artmaktadır. E10, en düşük viskozite değerine sahip olduğundan, düşük sıcaklıklarda dahi akışkanlık bakımından avantaj sağlamaktadır. E30 ise bu iki davranış arasında bir davranış göstermektedir. Yakıt sıcaklığı sabit tutulduğunda (Simülasyonda 20°C), basınç artışı yakıt moleküllerinin sıkışmasına bağlı olarak viskozitede küçük artışa neden olmaktadır Polar karakterinden dolayı E100 yakıtında bu etki daha belirgin olurken, benzin ağırlıklı ve apolar yapıda olan E10'da basınca bağlı değişim en düşük seviyede kalmaktadır. E30, bileşim özellikleri gereği bu iki davranış arasında yer almaktadır.



Şekil1. Viskozite – Sıcaklık Değişimi



Şekil2. Viskozite – Basınç Değişimi

200 bar çalışma basıncında, farklı statik debi sınıfları için çeşitli yakıt tipleri (E10, E30, E100) ve sıcaklıklarda (20 °C, 75 °C) ölçülen kuvvet değerlerinin 250 bar referansına göre yüzde değişimleri Tablo 1’de gösterilmiştir.

Tablo1. 250 bar Referansına Göre 200 bar Çalışma Basıncında İç Kuvvetlerin Yüzdesel Değişimleri

		250 Bar 'dan 200 Bar'a Değişim (%)			
		F İğne Oturma Yüzeyi	Fdurdurma halkası	Fdurdurma hültesi	F iç kutup
Statik Debi Min	E10_20C	-7.11%	-1.42%	-26.60%	2.45%
	E10_75C	-5.80%	1.99%	-16.33%	5.93%
	E30_20C	-6.93%	-1.62%	6.43%	1.30%
	E30_75C	-7.36%	2.77%	-12.52%	3.48%
	E100_20C	-6.93%	0.77%	-11.59%	5.37%
	E100_75C	-6.83%	-0.37%	-6.05%	1.57%
Statik Debi Max	E10_20C	-7.52%	-1.69%	-7.13%	5.94%
	E10_75C	-8.62%	1.07%	-10.73%	0.89%
	E30_20C	-7.15%	-0.81%	-13.91%	7.07%
	E30_75C	-9.42%	1.39%	-11.30%	6.95%
	E100_20C	-6.73%	-1.25%	22.15%	35.30%
	E100_75C	-7.89%	-0.44%	-11.26%	4.35%

200 bar çalışma koşullarında yapılan değerlendirmeler sonucunda, enjektör sisteminin farklı bölgelerinde ölçülen kuvvetlerin yakıt tipi, sıcaklık ve statik debi değişimine farklı duyarlılıklar gösterdiği belirlenmiştir.

İğne oturma yüzeyinde, statik debi arttıkça kuvvetlerde belirgin bir artış eğilimi gözlenmiştir. Örneğin E10 yakıtının 20 °C koşullarında düşük debideki kuvvet değeri, maksimum debi seviyesine çıktığında anlamlı bir artış göstermiştir. Bu eğilim, debi büyüdükçe iğne oturma kuvvetinin de arttığını ve iki değişken arasında doğru orantılı bir ilişki bulunduğunu ortaya koymaktadır.

Durdurma halkasında ölçülen kuvvetlerin büyük oranda kararlı kaldığı görülmüştür. Sıcaklık ve yakıt tipinin etkisi oldukça sınırlı olup, değişimler düşük seviyede seyretmiştir. Genel eğilim, bu bölgedeki kuvvetlerin çalışma koşullarından bağımsız olarak dar bir aralıkta sabit kaldığını göstermektedir.

Durdurma hültesinde ölçülen iç kuvvetlerin, yakıt tipine ve sıcaklığa oldukça duyarlı olduğu görülmektedir. Özellikle yüksek etanol içerikli yakıtların düşük sıcaklıklarda belirgin şekilde daha düşük kuvvetler ürettiği tespit edilmiştir. Maksimum debi koşullarında E10 ve E30 yakıtlarında daha yüksek kuvvet seviyelerine ulaşılırken, E100 yakıtı aynı koşullarda belirgin biçimde daha düşük kuvvetler üretmiştir. Bu durum, etanol oranı arttıkça ve sıcaklık azaldıkça hülse üzerindeki yük aktarımının zayıfladığını göstermektedir.

İç kutup bölgesinde ölçülen iç kuvvetlerin, tüm bölgeler arasında en yüksek değişkenliğe sahip olduğu görülmektedir. Yüksek etanol oranı ve düşük sıcaklık koşullarında kuvvetlerin belirgin şekilde arttığı, buna karşılık düşük etanol oranı ve yüksek sıcaklıkta en düşük seviyelere gerilediği tespit edilmiştir. Bu eğilim, özellikle

etanol oranının artması ve sıcaklığın düşmesi durumunda iç kutup bölgesinin aşırı yüklenmeye maruz kaldığını göstermektedir.

Genel olarak, etanol oranı yüksek yakıtların (E100) düşük sıcaklıklarda sistemde kuvvet dağılımında dengesizliklere yol açmıştır. Buna karşılık, E10 ve E30 yakıt tipleri daha dengeli bir davranış sergilemiştir.

Sıcaklık artışı, kuvvet dağılımını genel olarak azaltıcı yönde etkilemektedir. Özellikle iç kutup bölgesindeki kuvvetler, sıcaklığın yükselmesiyle birlikte belirgin şekilde düşmektedir. Ancak, etanol oranı yüksek olan E100 yakıtında düşük sıcaklık (20 °C) farklı bir tablo ortaya çıkarmıştır. Bu koşulda durdurma hültesi kuvveti en düşük seviyelere inerken, iç kutup kuvveti en yüksek değerine ulaşmıştır. Dolayısıyla sıcaklık, sadece viskozite değişimini değil, aynı zamanda yakıt bileşimine bağlı olarak sistem davranışını da etkilemektedir.

250 bar çalışma basıncında yapılan değerlendirmelerde, enjektör sisteminin farklı bölgelerindeki kuvvetlerin yakıt tipi, sıcaklık ve statik debi değişimlerine farklı duyarlılıklar gösterdiği belirlenmiştir.

İğne oturma yüzeyinde, statik debi arttıkça kuvvetlerde belirgin bir artış gözlenmiştir. Sıcaklık etkisine bakıldığında ise 20 °C ve 75 °C koşulları arasında anlamlı bir fark oluşmadığı, dolayısıyla bu bölgenin sıcaklık değişimine karşı görece duyarsız olduğu görülmüştür.

Durdurma halkasında oluşan iç kuvvetler daha kararlı bir yapı sergilemiş, hem yakıt tipi hem sıcaklık açısından önemli bir değişim göstermemiştir. Bu durum, bu bölgedeki kuvvet aktarımının çalışma koşullarından bağımsız olarak dar bir aralıkta sabit kaldığını göstermektedir.

Durdurma hültesinde ölçülen kuvvetlerin yakıt bileşimi ve sıcaklığa oldukça duyarlı olduğu görülmüştür. Özellikle yüksek etanol içerikli yakıtlarda (E100) düşük sıcaklık koşulunda ortaya çıkan kuvvetlerin diğer yakıt tiplerine kıyasla belirgin şekilde düşük olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, yüksek etanol oranının düşük sıcaklıklarda alt bileşen üzerindeki yük aktarımını zayıflattığını göstermektedir. Aynı eğilim 200 bar çalışma basıncında yapılan analizlerde de gözlenmiş olup, bu davranış basınca bağlı olmaksızın korunmuştur.

İç kutup bölgesinde, kuvvetlerin diğer bölgelere kıyasla çok daha geniş bir aralıkta değiştiği görülmüştür. Genel eğilim, etanol oranının artması ve sıcaklığın azalmasıyla

kuvvetlerin yükseldiği, sıcaklık artışıyla birlikte ise belirgin şekilde azaldığı yönündedir. Bu sonuç, iç kutup bölgesinin hem yakıt bileşimi hem sıcaklık değişimine en duyarlı bölge olduğunu ortaya koymaktadır.

3.SONUÇLAR

Sistem çalışma basıncı 250 bardan 200 bara düştüğünde iç kuvvet dağılımları belirlenen kritik alt parçaların her birinde farklı eğilimler göstermektedir.

İğne oturma yüzeyinde tüm koşullarda meydana gelen iç kuvvetler %6–9 arası azalma eğilimindedir.

Durdurma halkasındaki iç kuvvetler çok küçük değişimler göstermektedir (-2% ile +2%).

Durdurma hüllesinde kuvvetler çoğu koşulda azalma eğilimi sergilemiştir. E100_20 °C’de maksimum statik yakıt debisinde meydana gelen artış, yüksek etanol oranı ve düşük sıcaklık kombinasyonunun alt parçada meydana gelen kuvvet davranışını farklı etkilediğini ortaya koymaktadır.

İç kutup bölgesinde ise genel artış %1-7 arasındadır. E100_20°C ve maksimum yakıt debisinde kritik bir artış gözlemlenmiştir. Yüksek basınç, yüksek etanol oranı ve düşük sıcaklık birleştiğinde iç kutup bölgesine aşırı yük binmektedir.

Sonuç olarak, yakıt bileşimi ve sıcaklık etkilerinin tasarım ve validasyon süreçlerinde dikkate alınması önemlidir. Aksi halde kritik bileşenlerde erken yorulma ya da performans kaybı riski artabilir.

4.REFERANSLAR

[1]J.B. Heywood, Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw-Hill, 1988.

[2]R. Stone, Introduction to Internal Combustion Engines, 4th Edition, Palgrave Macmillan, 2012.

[3]Bosch, Gasoline Fuel-Injection System, Springer Vieweg, Robert Bosch GmbH, 2014

[4] Donders, K., Govers, J., & Serrarens, J. (2011). Model-based system simulation with LMS Imagine.Lab Amesim. Proceedings of the 8th International Modelica Conference, Dresden.

[5] A. Demirbas, Biofuels: Securing the Planet’s Future Energy Needs, Springer, 2009.

PFAS YASAKLARININ HDEV ENJEKTÖR O-RİNG MALZEME SEÇİMİNE ETKİSİ VE HNBR ALTERNATİFİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Mehmet Erman Yıldız

Bosch Sanayi ve Ticaret A.Ş., Eflatun Cadde, No:19, BURSA
mehmeterman.yildiz@tr.bosch.com

ÖZET

Avrupa Kimyasallar Ajansı'nın (ECHA) 2023 yılında yayımladığı PFAS (Per- and Polyfluoroalkyl Substances) kısıtlama teklifi, floropolimer esaslı elastomerlerin otomotiv yakıt sistemlerinde kullanımını doğrudan etkileme potansiyeline sahiptir. Benzinli enjektörlerde yaygın olarak kullanılan FKM (fluoroelastomer) O-ringler, yüksek sıcaklık ve agresif yakıt katkıları altında üstün kimyasal direnç göstermeleri nedeniyle tercih edilmektedir. Ancak PFAS'ın çevresel kalıcılığı ve insan sağlığı üzerindeki olumsuz etkilerinin giderek daha fazla ortaya konması, orta vadede bu malzemelerin yasaklanma riskini gündeme getirmiştir. Bu bağlamda, PFAS içermeyen veya daha düşük PFAS içeren elastomerlerin değerlendirilmesi kritik bir araştırma ihtiyacı haline gelmiştir.

Bu çalışmada, FKM'ye alternatif olabilecek yedi elastomer (FKM, FFKM, HNBR, NBR, AEM, EPDM, VMQ) sekiz performans kriterine göre incelenmiş; ön değerlendirme sonucunda kimyasal uyumsuzluk veya termal yetersizlik nedeniyle NBR, AEM, EPDM ve VMQ elenmiştir. Ön elemeyi geçen HNBR için beş farklı tedarikçi (Supplier A-E) ile çalışma yapılmış ve detaylı şişme, soğuk dayanımı ve mekanik testler gerçekleştirilmiştir. Bulgular, HNBR'nin -40 °C düşük sıcaklık koşullarında yeterli elastikiyet gösterdiğini, ancak alkol katkılı yakıtlarla (E24, M15) şişme oranlarının %56-120 aralığında gerçekleşerek kabul edilebilir sınırları ($\leq\%25$) aşabildiğini ortaya koymuştur.

Çalışmanın bulguları, PFAS içermeyen elastomerlerde FKM ile eşdeğer performans sunabilecek bir malzeme bulunmadığını; şişme davranışı ile düşük sıcaklık dayanımı arasındaki ters orantının mevcut teknolojilerle çözülemediğini göstermektedir. Bu nedenle otomotiv sektörünün bazı aplikasyonlar için kısa vadede FKM'yi ikame etmekten ziyade, PFAS miktarı azaltılmış yeni formüle yönelebileceği ihtimali artmıştır. Regülasyonların 2027 itibarıyla PFAS'ın geniş ölçekte yasaklanmasını öngörmesi, üç stratejik ihtiyacı doğurmaktadır: (1) şişme açısından kritik parçalar için conta hazne toleranslarının şişme

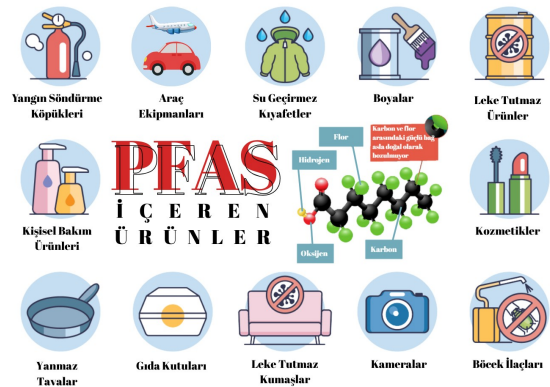
riskini minimize edecek biçimde genişletilmesi, (2) tedarik zincirinde düşük PFAS içerikli yeni malzemelere ve alternatif tedarikçilere uyum sağlanması ya da (3) kimyasal ve termal açıdan kritik olmayan dizaynların HNBR gibi alternatiflerle değiştirilmesi.

Bulgular, HNBR'nin kısmi potansiyeline rağmen FKM'nin yerini alamayacağını ve sektörün orta vadede düşük PFAS içerikli floropolimerlere odaklanmak zorunda olduğunu ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: PFAS, FKM, HNBR, O-ring, Yakıt Sistemleri, Şişme Davranışı, ECHA Regülasyonları

1. GİRİŞ

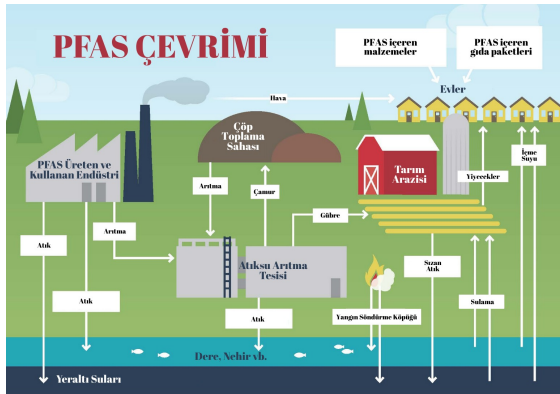
PFAS, 1940'lı yıllardan itibaren üretilen geniş bir sentetik kimyasal ailesini oluşturmaktadır. Su, yağ ve ısıya karşı üstün dirençleri sayesinde bu maddeler tekstil, gıda ambalajları, tencere kaplamaları, yangın söndürme köpükleri, otomotive ve havacılık sanayisi gibi birçok alanda hızla yaygın kullanılmaya başlanmıştır.



Şekil 1. PFAS Barındıran Ürünler [4]

Otomotiv sektöründe ise PFAS esaslı polimerler, özellikle florokarbon elastomerler (FKM) ve politetrafloroetilen (PTFE), yüksek sıcaklık ve agresif yakıt katkılarına karşı gösterdikleri direnç nedeniyle yakıt sistemlerinin vazgeçilmez malzemeleri olmuştur. Modern benzinli enjektörlerde kullanılan O-ring contalar, yakıtla sürekli temas halinde oldukları için FKM gibi

floropolimer elastomerlerin üstün performansına ihtiyaç duymaktadır. Bununla birlikte, PFAS'ın çevresel ve sağlık üzerindeki etkileri son yıllarda yoğun şekilde araştırılmakta ve giderek artan ölçüde kaygı konusu olmaktadır. PFAS'ın temel kimyasal özelliği olan karbon-flor bağının olağanüstü dayanıklılığı, bu maddelerin doğada kalıcılığını da beraberinde getirmektedir. Bu nedenle PFAS, “ebedi kimyasallar” (forever chemicals) olarak adlandırılmakta ve toprakta, suda, hatta insan kanında bile onlarca yıl bozulmadan varlığını sürdürebilmektedir. Çeşitli çalışmalar, PFAS maruziyetinin kanser, karaciğer fonksiyon bozuklukları, hormonal dengesizlikler, bağışıklık sistemi zayıflıkları ve üreme sağlığı sorunları gibi ciddi sağlık etkileriyle ilişkili olduğunu ortaya koymuştur. İsveç'in Ronneby kentinde yaşanan vakada, yeraltı suyuna karışan PFAS'ın içme suyu yoluyla bölge halkının kanında güvenli sınırların yüzlerce katına varan birikimlere neden olduğu bildirilmiştir. [5] Bu tür vakalar, yalnızca bireysel sağlığı değil, aynı zamanda toplumsal güveni ve çevre politikalarını da derinden etkilemektedir.



Şekil 2. Doğada PFAS Çevrimi [6]

Avrupa Kimyasallar Ajansı (ECHA) tarafından 2023 yılında yayımlanan kısıtlama teklifi [1], 2027 itibarıyla PFAS'ın geniş ölçekte yasaklanmasını öngörmekte ve yalnızca sınırlı istisnalara izin vermektedir. Benzer şekilde, ABD Çevre Koruma Ajansı (EPA) da içme sularında PFAS limitlerini ciddi şekilde düşürmeye yönelik düzenlemeler hazırlamaktadır. [2] Bu gelişmeler, otomotiv sektöründe floropolimer esaslı malzemelerin uzun vadeli kullanılabilirliğini belirsiz hale getirmektedir. Özellikle benzinli enjektörlerde yakıtla doğrudan temas eden FKM O-ringlerin yasaklanma ihtimali, malzeme mühendisliği açısından kritik bir problem oluşturmaktadır.

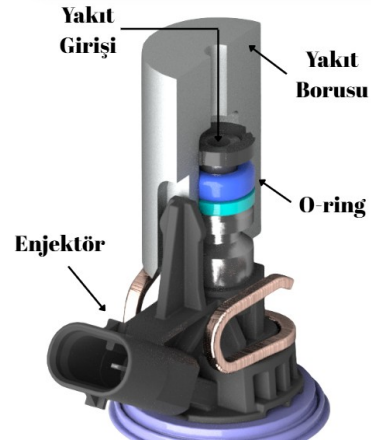
Bu makale, PFAS yasaklarının benzinli enjektörlerde O-ring malzeme seçimine olası etkilerini ele almakta ve mevcut alternatifler arasında HNBR (hidrojene nitril butadien kauçuk) elastomerinin potansiyelini değerlendirmektedir. Çalışmanın amacı, regülasyonların getirdiği baskılar ışığında FKM'ye eşdeğer performans

sunabilecek PFAS içermeyen bir elastomer olup olmadığını belirlemek, HNBR'nin bu bağlamdaki sınırlarını ortaya koymak ve sektörün gelecekteki yönelimlerini tartışmaktır. Bu ihtiyaç, yalnızca mühendislik düzeyinde bir tasarım sorunu değil, aynı zamanda çevre sağlığı, tedarik zinciri yönetimi ve regülasyonlara uyum açısından da stratejik önem taşımaktadır.

2. YÖNTEM

2.1 – Benzinli Enjektör

Benzinli enjektör, 350 bar basınç altında çalışan ve motora yakıt püskürtten bir elemandır. Enjektörün yakıt giriş noktasında bulunan o-ring ise giriş noktasındaki basıncı karşılamak ve sızdırmazlığı sağlamakla görevlidir. Mevcut malzemesi PFAS kapsamında bulunan **“FKM”**dir.



Şekil 3. Benzinli Enjektör Kesiti

2.2 – Endüstrideki Elastomer Alternatifleri

O-ring'ten beklenen sızdırmazlık fonksiyonunu yerine getirebilmesi için çeşitli çalışma ve dayanım şartları dört ana başlık altında belirlenmiş ve bu şartlar malzeme değerlendirmelerinde önemli rol oynamıştır:

A-Kimyasal

- **Mineral Oil Compatibility:** Numunelerin mineral yağ ile uzun süreli temasında şişme ve mekanik bozulma gözlemlenip gözlemlenmediği.
- **Gasoline Compatibility:** Saf benzin ortamında kimyasal uyumluluk.
- **Swelling Tests:** Hacimsel şişme yüzdesi, farklı ortamlar için ayrı ayrı belirlenmiştir ve o-ring'in çıkmadan enjektör üzerinde kalması için önemlidir.
 - Mineral Oil (% değişim)
 - Pure Gasoline (% değişim)
 - Methanol M15 (% değişim)
 - Ethanol E24 veya E30 (% değişim)

B-Termal

- **Heat Resistance (@100 hours):** 100 saatlik yüksek sıcaklık maruziyeti sonrası malzemenin özelliklerini koruma kapasitesi (°C).
- **Cold Resistance (@2 hours):** -40 °C gibi düşük sıcaklıklarda, iki saatlik test süresinde elastomerin elastikyetini koruma yeteneği (°C).

C-Mekanik

- **Tensile Strength (MPa):** Çekme dayanımı.
- **Elongation at Break (%):** Kopma anındaki uzama oranı.
- **Hardness (IRHD):** Shore ölçeğinde malzeme sertliği.
- **Compression Set (%):** Belirli sıcaklık ve süre sonrasında sıkıştırılmış halde tutulan malzemenin geri dönüş oranı.
- **Fatigue (TWDL TEST by Bosch, Hours):** Bosch tarafından uygulanan TWDL yorulma testinde malzemenin dayanım süresi.
- **Explosive Decompression (Crack):** Ani basınç boşaltımı altında çatlak oluşup oluşmadığının değerlendirilmesi.
- **TR10 (°C):** Malzemenin düşük sıcaklık esneklik sınırı (brittleness transition temperature).

D-Diğer

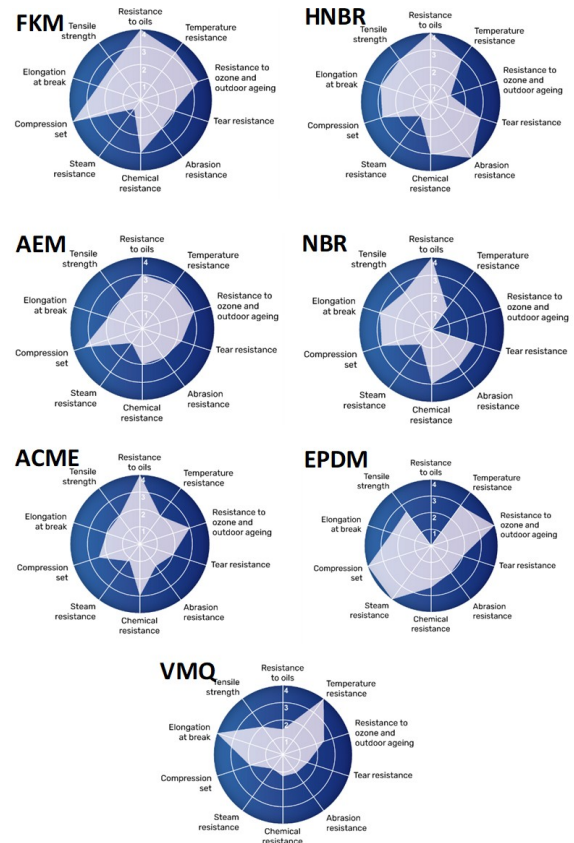
- **Cost (USD/kg):** Malzemenin kilogram başına maliyeti.
- **Market Availability:** Piyasada bulunabilirlik ve tedarik sürekliliği.

Test kriterleri belirlendikten sonra, otomotiv endüstrisinde kullanılan veya literatürde yer bulan elastomerler değerlendirilmiştir. Bu amaçla yedi farklı elastomer ailesi incelenmiştir: **FKM**, **HNBR**, **AEM**, **NBR**, **ACME**, **EPDM** ve **VMQ**. Değerlendirme, grafiklerde özetlenen başlıca performans göstergeleri (çekme dayanımı, uzama, sıcaklık dayanımı, yağ ve yakıt direnci, ozon/yaşlanma direnci, yırtılma ve aşınma direnci, sıkıştırma seti ve kimyasal direnç) üzerinden yapılmıştır.

- **FKM:** O-ring'in mevcut malzemesi olan en yüksek performans profiline sahip gruptur. Bununla birlikte PFAS içerikleri nedeniyle uzun vadeli regülasyon riski taşımaktadır.
- **HNBR:** Orta-üst seviyede performans sunmaktadır. Sıcaklık dayanımı ve yağ direnci kabul edilebilir düzeydedir. Mekanik özellikleri (çekme dayanımı, uzama) yeterli, ozon ve yaşlanma direnci tatmin edicidir. Ancak kimyasal direnç, özellikle alkol katkılı yakıtlarla

karşılaştırıldığında FKM seviyesine ulaşamamaktadır.

- **AEM:** Yağ direnci ve sıkıştırma seti açısından dengeli bir profil sergilese de sıcaklık ve kimyasal direnç sınırlıdır. Bu nedenle uzun süreli yakıt temasına uygunluğu kısıtlıdır.
- **NBR:** Mekanik özellikleri güçlüdür ve düşük sıcaklıklarda esneklik avantajına sahiptir. Ancak yüksek sıcaklık dayanımı sınırlı, kimyasal direnç ise özellikle oksijenli yakıtlarda zayıftır.
- **ACME:** Çekme dayanımı ve uzama özellikleri ortalama seviyededir. Ancak kimyasal direnç ve sıcaklık dayanımı yetersizdir; bu nedenle yakıt sistemi uygulamaları için elenmiştir.
- **EPDM:** Ozon ve yaşlanma direnci oldukça iyidir, mekanik olarak dengeli bir profil sergiler. Ancak yakıt ve mineral yağlarla kimyasal uyumluluğu zayıftır, bu nedenle otomotiv yakıt sistemlerinde uygun değildir.
- **VMQ (Silikon Kauçuk):** Çok geniş sıcaklık aralığında esneklik sağlayabilir. Ozon ve yaşlanmaya karşı dirençlidir. Ancak yakıt ve yağlara karşı kimyasal uyumluluğu sınırlı olduğundan bu çalışmanın kapsamındaki uygulamalarda tercih edilmemektedir.



Şekil 4. Otomotiv Marketindeki Elastomerler

2.3 – Elastomer Seçimi

Belirlenen sekiz performans kriteri doğrultusunda hazırlanan gereklilikler tablosu (Şekil 5) , mevcut elastomerlerin otomotiv yakıt sistemi koşullarındaki performansları ile karşılaştırılmıştır. Değerlendirme sonucunda NBR, ACME, EPDM ve VMQ kimyasal uyumsuzluk veya termal yetersizlik nedeniyle erken aşamada elenmiştir. AEM tek tedarikçi ve düşük sıcaklık performansı nedeniyle kritik gereklilikleri karşılayamamıştır.

Özellikler	Birim	Gereklilikler	HNBR	AEM	NBR	ACME	EPDM	VMQ
Kimyasal								
Yağ Direnci		Evet						
Yakıt Direnci		Evet						
Yağda Şişme	%	N/A		TBD				
Benzinde Şişme	%	25		TBD				
Metanolde Şişme	%	25		TBD				
Etanolde Şişme	%	25		TBD				
Termal								
Yüksek Sıcaklık Dayanım	°C	Çalışma: +150 Test: +250 (FKM)	175°C	150°C	100°C	150°C	150°C	200°C
Düşük Sıcaklık Dayanım	°C	Çalışma: -40 Test: -25 to -15	-50°C	-30°C	-60°C	-25°C	-60°C	-60°C
Mekanik								
Kopma Dayanımı	MPa	8	10 to 20	10 to 20	1 to 21	6 to 12	4.2 to 18	2 to 9
Kopmada Uzama	%	150	120 to 500	150 to 350	70 to 800	80 to 250	85 to 600	175 to 600
Sertlik	Shore-A	80	55 to 90	55 to 80	15 to 94	50 to 84	25 to 90	20 to 79
Sıkıştırma Seti	%	≤45 (70h, 200°C, FKM)	20 to 70	TBD	10 to 60	25 to 30	20 to 50	20 to 45
Diğer								
Ulaşılabirlik		kısıt olmamalı		tek tedarikçi		tek tedarikçi		
			kritik	uygunsuz	uygun			

Şekil 5. Elastomer ve Gereklilik Karşılaştırması

Karşılaştırma neticesinde HNBR, yağ ve yakıt direnci, düşük sıcaklık performansı ve mekanik özellikler açısından nispeten dengeli bir profil sunmuş ve sonraki aşamada detaylı testler için aday malzeme olarak seçilmiştir.

2.4 – Testler ve Tedarikçi Karşılaştırması

Elastomer alternatifleri HNBR'a indirildikten sonra, farklı tedarikçilerin HNBR varyantlarını karşılaştırmak ve en iyi performanslısını belirlemek amacıyla detaylı şişme testleri gerçekleştirilmiştir. Ön eleme sürecinde diğer mekanik, termal ve kimyasal özellikler literatür ve tedarikçi verileri ile yeterli görüldüğünden, detaylı değerlendirmeye enjektör için en kritik faktörlerden biri olan şişme davranışı testleri ile başlanmıştır. Bu testin olumlu olması sonucunda diğer özelliklere ve testlere odaklanılması planlanmıştır.

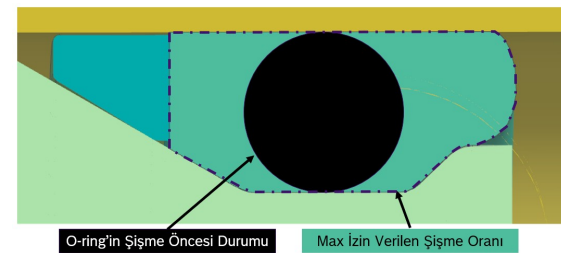
Bu kapsamda beş tedarikçi ile çalışılmıştır. Tedarikçi B-C ve E, HNBR malzemesinde istenen soğuk dayanım şartlarına erişemediğinden ilk görüşmeler sonucunda elenmiştir. Tedarikçi A ve D numuneleri ise saf benzin, metanol katkılı yakıt (M15) ve etanol katkılı yakıt (E24/E30) ortamlarında test edilmiştir.

Şartlar	Unit	Req	Tedarikçi A	Tedarikçi D
SOĞUK DAYANIMI				
Soğuk Dayanımı	°C	-40	-45	-40
TR10	°C	≤-36	-31	-33
ŞİŞME PERFORMANSI				
Yakıtta Şişme	%	25	55	94
Metanolde Şişme	%	25	75.8	120
Etanolde Şişme	%	25	69.3	109
DİĞER				
Yüksek Sıcaklık Dayanımı	°C	+150	150	150
Kopma Dayanımı	MPa	8	19.6	>15
Kopmada Uzama	%	150	196	>150
Sertlik	IRHD	80	74	70
Kompres Set Değeri	%	≤45	30	35
Yüksek Basınç Direnci	Crack	No-crack	?	?
Yağ Direnci	-	Yes	ok	ok
Yakıt Direnci	-	Yes	ok	ok

Şekil 6. HNBR Malzemesi İçin Tedarikçi Kıyası[7]

Saf benzin ortamı sonuçlarında şişme değerleri %55 ile %94 arasında değişmiştir. Supplier A numunesi %55 ile en düşük şişmeyi gösterirken, Supplier D de benzer şekilde görece düşük değerlerle öne çıkmıştır. Supplier E'nin numunelerinde %90'ın üzerinde şişme gözlenmiştir. Metanol M15 ortamı sonuçları %75,8 ile %120 aralığında gerçekleşmiş, tüm tedarikçi numuneleri kabul edilebilir sınıır çok üzerinde kalmıştır. Etanol E24/E30 ortamı testlerinde ise şişme oranları %69,3 ile %109 arasında değişmiş, bu değerler yine belirlenen limitlerin üzerinde bulunmuştur.

Bu karşılaştırma, tedarikçiler arasında belirli farklılıklar olmakla birlikte, genel eğilimin alkol katkılı yakıtlarla birlikte HNBR'nin yüksek şişme eğilimi göstermesi olduğunu ortaya koymuştur.



Şekil 7. Sıvıyla Temas Sonrası Şişmiş O-ring

Farklı enjektör tiplerindeki farklı geometriler, farklı şişme oranlarına izin vermektedir. En dar durum gözetilerek %25 şişme şartı belirlenmiş ve o-ring'in çıkmadan enjektör üzerinde kalması için bu değer sınırlandırılmıştır.

HNBR malzemesiyle yapılan testlerde ölçülen şişme değerlerinin kabul edilebilir sınırların üzerinde kalması, mevcut tasarım limitleri ve geometrileri dikkate alındığında O-ring malzemesinin doğrudan FKM'den HNBR'a geçişini mümkün kılmamaktadır.

3. SONUÇLAR

PFAS, çevresel kalıcılıkları ve potansiyel sağlık riskleri nedeniyle “ebedi kimyasallar” olarak tanımlanmaktadır. Karbon-flor bağının yüksek stabilitesi sayesinde bozunmaya dirençli olan bu maddeler, su ve toprakta birikmekte ve insan kanında ölçülebilir düzeylere ulaşmaktadır. Son yıllarda yapılan epidemiyolojik çalışmalar PFAS maruziyetini kanser, bağışıklık sistemi bozuklukları ve hormonal dengesizlikler gibi ciddi sağlık sorunlarıyla ilişkilendirmiştir. Bu nedenlerle Avrupa Kimyasallar Ajansı (ECHA) ve ABD Çevre Koruma Ajansı (EPA) tarafından PFAS’ın geniş ölçekte kısıtlanması gündeme gelmiş; 2027 itibarıyla büyük çoğunluğunun yasaklanması beklenmektedir.

Bu regülasyon baskısı, otomotiv sektöründe özellikle benzinli enjektörlerde kullanılan FKM (fluoroelastomer) O-ringler için kritik bir belirsizlik yaratmaktadır. FKM, yüksek sıcaklık dayanımı ve yakıt katkılarına karşı kimyasal direnci sayesinde standart malzeme haline gelmiştir. Ancak PFAS içerdiğinden uzun vadede sürdürülebilirliği tartışmalı hale gelmiştir.

Bu çalışmada FKM’nin yerine geçebilecek elastomer alternatifleri sekiz kriter üzerinden değerlendirilmiş, mekanik veya kimyasal uyumsuzluklar nedeniyle NBR, AEM, EPDM, ACME ve VMQ erken aşamada elenmiştir. FFKM ise yine yüksek performansına rağmen PFAS içerdiği için ikame arayışının dışında tutulmuştur. Ön elemeyi geçen tek aday HNBR olmuştur.

HNBR için beş farklı tedarikçiden (Supplier A–E) numuneler temin edilmiş ve şişme davranışı test edilmiştir. Sonuçlar, tüm varyantların özellikle alkol katkılı yakıtlarla (M15, E24/E30) kabul edilebilir sınırların (%25) çok üzerinde şişme gösterdiğini ortaya koymuştur.

- **Saf benzin ortamında** şişme değerleri %55–94 arasında bulunmuş, Supplier A ve Supplier D görece daha düşük değerlerle öne çıkmıştır.
- **Metanol M15 ortamında** şişme %75–120 aralığında gerçekleşmiş, hiçbir numune kabul edilebilir sınırları karşılamamıştır.
- **Etanol E24/E30 ortamında** şişme %69–109 aralığında ölçülmüştür.

Bu sonuçlar göstermektedir ki HNBR, düşük sıcaklıkta esneklik ve mekanik özellikler açısından avantajlı olsa da, yakıt katkılarıyla şişme davranışı nedeniyle FKM’nin yerine kullanılmaya uygun değildir. Özellikle HDEV4 ve HDEV5 platformlarında izin verilen şişme limitleri (%21–23) ile kıyaslandığında, HNBR’nin değerleri bu sınırların çok üzerindedir. HDEV6 platformunda saf benzin koşullarında sınırlı uyum gözlenirse de, alkol katkılı yakıtlarla başarısızlık sürmektedir.

Dolayısıyla PFAS içermeyen elastomerlerin mevcut haliyle **FKM’ye eşdeğer performans**

sağlayamadığı sonucuna varılmıştır. Bu durum sektörde iki yönelim doğurmaktadır:

1. **PFAS katkısı azaltılmış yeni floropolimer formülasyonlarının geliştirilmesi.** Günümüzde araştırmalar, tamamen PFAS’sız elastomerler yerine PFAS oranı düşürülmüş çözümlere odaklanmaktadır.
2. **Tasarım ve tedarik stratejilerinin uyarlanması.** O-ring hazne toleranslarının şişme riskini dengeleyecek şekilde genişletilmesi ve tedarik zincirinin alternatif malzemelerle çeşitlendirilmesi önerilmektedir.

Sonuç olarak, PFAS regülasyonları otomotiv sektöründe yalnızca bir çevresel uyum sorunu değil, aynı zamanda mühendislik tasarımı ve tedarik zinciri yönetimi açısından stratejik bir kırılma noktası yaratmaktadır. HNBR’nin mevcut haliyle çözüm olamayışı, sektörü düşük PFAS içerikli yeni floropolimerler geliştirmeye ve gelecekteki regülasyonlara hazırlıklı olmaya zorlamaktadır.

4. REFERANSLAR

[1]Avrupa Kimyasallar Ajansı (ECHA). (2023). PFAS’ların kısıtlanmasına yönelik Annex XV teklif dosyası. Erişim: <https://echa.europa.eu>

[2]Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı (EPA). (2023). PFAS Stratejik Yol Haritası 2021–2024. Erişim: <https://www.epa.gov/pfas>

[3]Rubber Technologist’s Handbook, J.R. White, S.K. De, Sf-47-87

[4]The National Wildlife Federation Blog FoodPrint. (2023). The FoodPrint of PFAS. Erişim: <https://foodprint.org/reports/the-foodprint-of-pfas/>

[5]The Guardian. (2025, 19 Haziran). Dünyanın “en kötü PFAS kirliliği vakası”: İsveç’te bir kasabanın içme suyu zehirlendi. Erişim: <https://www.theguardian.com/environment/2025/jun/19/world-worst-case-of-pfas-forever-chemicals-contamination-kallinge>

[6]National Wildlife Federation. (2024, Nisan 10). PFAS Exposure for People and Wildlife. Erişim: <https://blog.nwf.org/2024/04/pfas-exposure-for-people-and-wildlife/>

[7]Supplier A–E (2023). Yakıt sistemlerine yönelik HNBR elastomer teknik veri sayfaları. Üretici iç dokümantasyonu.

Krom Kaplı Parçaların Krom Tutunma Dayanımının Mekanik Test ile Değerlendirilmesi ve Tutunma Dayanımının İyileştirilmesi

Damla Akabali¹, Mehmet Erman Yıldız²

¹Bosch San. Ve Tic. A. S. Yeşil Cd. No:15 TÜRKİYE
Tel. +90 224 219-3683 E-Posta: damla.akabali@tr.bosch.com

²Bosch San. Ve Tic. A. S. Yeşil Cd. No:15 TÜRKİYE
Tel: +90 224 219-2500 E-Posta: mehtemerman.yildiz@tr.bosch.com

ÖZET

Motor verimliliğini arttırmak amacıyla enjektörlerin daha yüksek basınçlarda çalışmasını gerekli kılmaktadır. Bu durum, fonksiyon sırasında çarpışmaya maruz kalan alt parçaların dayanımını artırmak için yüzey işlemlerini zorunlu hale getirmiştir. Bosch Benzinli Sistemlerde bu amaçla sert krom kaplama kullanılmaktadır. Ancak yapılan testlerde, sert krom kaplı armature alt parçalarında mikron seviyesinde kaplama dökülmeleri gözlemlenmiştir. Bu çalışma, krom kaplama proses parametrelerinin optimize edilerek adezyonun artırılmasını ve elde edilen iyileştirmelerin hızlı, güvenilir yöntemlerle test edilmesini amaçlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: krom kaplama, adezyon, mekanik darbe testi, benzinli enjektör, deney tasarımı.

1. GİRİŞ

Günümüzde motor verimliliğini arttırmak amacıyla, daha yüksek performanslı ve düşük emisyonlu motorların geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu gereklilik, yakıt enjektörlerinin çalışma basınçlarının artırılmasına neden olmuş ve beraberinde enjektör alt parçalarının fonksiyon sırasında maruz kaldığı tekrarlayan çarpışmaların dayanım açısından kritik hale gelmesine yol açmıştır. Bu koşullar altında, aşınma ve hasarların önlenmesi amacıyla çeşitli yüzey işlem yöntemleri uygulanmaktadır.

Bu yöntemlerden biri olan sert krom kaplama, Bosch Benzinli Sistemlerde yüksek basınçlı selenoid enjektörlerin bazı alt parçalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Sert krom kaplamada en önemli kalite kriterlerinden biri, kaplama tabakası ile alt yüzey arasındaki adezyondur. Adezyon; mekanik kilitleme (*keying effect*), yüzey enerjisi ve kimyasal bağlanma gibi mekanizmalarla sağlanır. Adezyon kuvvetini güvence altına almak için çeşitli test yöntemleri kullanılmakta olup, kaplamanın uzun süreli dayanımı açısından bu parametre kritik rol oynamaktadır.

Bununla birlikte, kaplamalarda özellikle keskin köşe ve kenar bölgelerinde kaplama kalınlığının

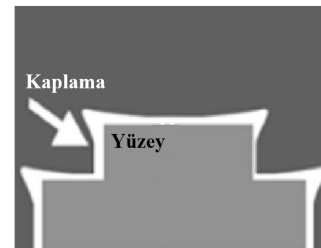
lokal olarak artmasıyla ortaya çıkan ve literatürde “*dog bone effect*” olarak adlandırılan olgu, kaplama homojenliğini bozarak lokal gerilimlerin oluşmasına neden olmaktadır. Bu durum, adezyonun zayıflamasıyla birlikte kaplamada delaminasyon ve mikron seviyesinde dökülmelerin gözlenmesine yol açabilmektedir.

2. YÖNTEM

2.1 Krom Kaplama Proses Optimizasyonu

Sert krom kaplama, elektrokimyasal bir yöntem olup öncelikle yüzey hazırlama adımı ile başlamaktadır. Yüzey hazırlamanın temel amacı, yüzeyin kirliliklerden ve oksit tabakasından arındırılarak aktif hale getirilmesidir. Böylelikle kaplamanın yüzeye iyi tutunması sağlanmakta ve homojen, kararlı bir kaplama elde edilmektedir.

Elektrolitik kaplamalar; seri üretime uygunluk, farklı metallerin kaplanabilmesi ve nispeten düşük maliyet gibi önemli avantajlara sahiptir. Bununla birlikte, kompleks geometrilere sahip parçalarda yüksek akım yoğunluğu kaynaklı homojen olmayan kaplama kalınlıkları oluşabilmektedir. Dog bone effect olarak adlandırılan bu durum Şekil 1’de görülmektedir.



Şekil 1. Dog Bone Effect

Bu çalışmada, armatür parçalarının keskin köşe bölgelerinde parça geometrisinden kaynaklanan homojen olmayan kaplama dağılımları incelenmiştir. Enjektör ömür testleri sonrasında bu bölgelerde kaplama hasarları gözlemlenmiştir. Ancak, parça geometrisinde yapılacak olası değişiklikler enjektörün fonksiyonunu doğrudan etkileyebileceğinden, bu sorunun çözümü için

geometri değişikliği yerine kaplama proses parametrelerinin optimizasyonuna gidilmiştir.

Köşelerde oluşan keskin kaplama profillerini önlemek ve kaplama adezyonunu artırmak amacıyla yüzey aktivasyonu ve kaplama proses parametrelerinde optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu optimizasyon süreci, Tablo-1’de görüldüğü gibi planlı bir deney tasarımı (Design of Experiments, DoE) yaklaşımı kullanılarak sistematik bir şekilde yürütülmüştür.

Tablo 1 – Kaplama Profili Deney Tasarımı

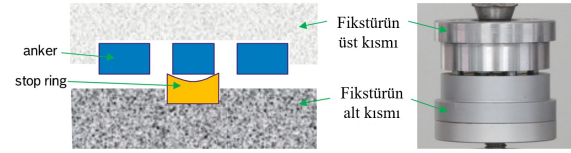
Deney Seti	Aktivasyon	Kaplama
1	Current	Current
2	Current	Modified
3	+ 40%	Current
4	+ 60%	Current
5	+ 40%	Modified
6	+ 60%	Modified

2.2 Mekanik Darbe Testinin Geliştirilmesi

Kaplamanın adezyonunu test etmek için seri üretimde kullanılan yöntemlerden biri tambur aşındırma testidir. Bu yöntemde, kaplaması değerlendirilecek parçalar aşındırıcı medya ve sıvı içeren bir tambur içerisinde döndürülmektedir. Test sonrasında parçalar mikroskop altında incelenerek kaplama yapışma kalitesi değerlendirilmektedir. Ancak bu test, dış kaynaklı yapılması, uzun süresi ve yüksek maliyeti nedeniyle dezavantajlıdır.

Diğer bir yöntem ise sekiz hafta süren enjektör dayanım testidir. Bu yöntemde krom kaplı alt parçalar, enjektör montajına dahil edilerek motor koşullarını simüle eden bir test sürecine tabi tutulmaktadır. Dayanım testinin avantajı yüksek güvenilirlik sağlamasıdır; ancak uzun test süreleri ve yüksek maliyet bu yöntemin en önemli kısıtlarıdır.

Bu sınırlamalar doğrultusunda hem enjektörün fonksiyonunu simüle eden hem de kaplama yapışmasını doğrudan değerlendirebilen, şirket içinde hızlı ve güvenilir bir test metoduna ihtiyaç duyulmuştur. Bu kapsamda, Mekanik Darbe (Mechanical Pulse) Testi’nin tasarımı, optimizasyonu ve validasyonu üzerine çalışmalar yürütülmüştür. Geliştirilen servo-hidrolik sistem üzerinde 0–5 kN darbe kuvveti, 1–20 Hz frekans aralığı ve 10^5 çevrime kadar programlanabilir parametreler tanımlanmıştır. Ayrıca yalnızca köşe temasını garanti eden özel bir stop ring tasarlanmış ve Şekil 2’deki anker–stop ring fikstürü geliştirilmiştir.

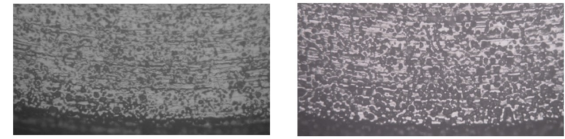


Şekil 2. Fikstür ve mekanizması

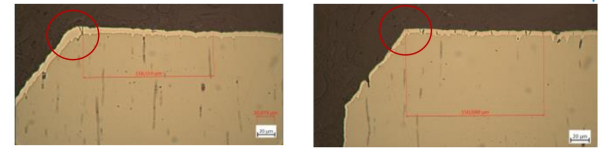
Deney tasarımına gidilmeden önce yapılan çalışmalarda optimum çevrim süresi belirlenmiş olup diğer değişkenlerle ilgili bir deney tasarımı (DoE) yapılmıştır. Burada farklı proses parametreleriyle kaplanan parçalar farklı kuvvet ve kaplama profili optimize edilmiştir.

3. SONUÇLAR

Aktivasyon adımı gerçekleştirilen proses optimizasyonu kapsamında akım ve süre parametreleri optimize edilmiş, ardından elde edilen parçalar metalografik olarak incelenmiştir. Şekil 3’te yer alan mikroskop analizleri, optimizasyon öncesine kıyasla aktivasyon yoğunluğunda belirgin bir artış olduğunu göstermiştir. Şekil 4’teki kesit incelemeleri ise optimizasyon sonrası mekanik yapışmanın iyileştiğini ortaya koymuş ve kaplama yapışma dayanımında gelişme sağlandığını doğrulamıştır.



Şekil 3. Aktivasyon optimizasyonu öncesi ve sonrası



Şekil 4. Köşe kaplama optimizasyonu öncesi ve sonrası

Yine Şekil 4’te görüldüğü gibi, kaplama proses hızının düşürülmesiyle elektrokimyasal birikme yavaşlatılıp kaplamanın köşelerde keskin olarak birikmesi önlenmiştir. Optimize edilmiş köşe kaplama bölgesiyle üretilen enjektör, fonksiyon sırasında herhangi bir kaplama hasarına yol açmaması garanti altına alınmıştır.

Ayrıca, geliştirilen Mekanik Darbe Testi, mevcut mekanik aşındırma testinin yerine geçerek daha kısa sürede daha güvenilir sonuçlar sağlamıştır. Mekanik deformasyon etkisi nedeniyle bu test, sekiz haftalık enjektör dayanım testi için bir ön koşul olarak konumlandırılmıştır. Böylece test süreçlerinde hem zaman hem de maliyet açısından önemli kazanımlar elde edilmiştir. Kaplama parametreleri optimize edilen parçalar üzerinde

1.000.000 darbe sonrasında dahi krom dökülmesi gözlemlenmemiş, saha iade riski proaktif olarak ortadan kaldırılmıştır.

Sonuç olarak, önerilen Mekanik Darbe Testi; krom kaplama performansını enjektör uygulamalarındaki gerçek yük koşullarına yakın şekilde değerlendirebilen, hızlı ve düşük maliyetli bir kurum içi standart haline gelmiştir. Yöntemin benzer hassas hidromekanik bileşenlerde kalite güvence süreçlerine entegre edilebilme potansiyeli, olası kalite sapmalarının erken aşamada tespit edilmesine olanak tanımakta ve bu durum hem üretici hem de son kullanıcı açısından güvenilirliği artırmaktadır.

3. REFERANSLAR

- [1] Dr. A.R. Jones, S. Sugawara, Dr. J. Enloe, “Adhesion Testing of Hard Chromium Electrodeposits” Atotech, 2000
- [2] C.M. Cotell, J.A. Sprague, F.A. Smidt Jr, “ASM Handbook, Volume 5: Surface Engineering”, ASM International, 1994, s.684-686
- [3] H.E Haring, W.P. Barrows, “Electrodeposition of Chromium from Chromic Acid Baths”, Bureau of Standards, 1927, s.433-438

AĞIR VASITA ARAÇLAR İÇİN PEDAL TASARIMI VE ANALİZİ

Sinan BAYSAL¹, Onur AYVAZ¹, Rabia Şevval AKAN¹, Hüseyin DEĞİRMENCI¹

¹AKA OTOMOTİV A.Ş. Fatih Mahallesi Örnekköy Yolu 1/1, Bursa TÜRKİYE
Tel: 224 270 33 00 E-Posta: s.baysal@akaoto.com.tr, oayvaz@akaoto.com.tr, r.akan@akaoto.com.tr,
h.degirmenci@akaoto.com.tr

Özet- Uzun yol şoförleri, bir gün içinde pedalları ortalama 10-11 saat boyunca aktif olarak kullanmaktadır. Bu nedenle pedalın kuvvet gereksinimi, açısı ve ayak hareket mesafesi gibi faktörlerin, sürücü yorgunluğunu azaltacak şekilde tasarlanması gerekmektedir. Ek olarak, pedal sistemlerinin milyonlarca kez kullanılacağı göz önünde bulundurulduğunda, dayanıklılık ve malzeme seçimi gibi mühendislik kriterleri de son derece kritik olmaktadır. Otomotiv Sanayinde Mühendislik konu başlığı kapsamında sunulan bu çalışmada, kamyonlar için fren pedalı 1B analizi, 3D tasarımı, CAE analizi (misuse, dayanım ömür ve NVH analizleri) ve doğrulama testleri gerçekleştirilmiştir. Tasarım çalışmaları ECE-R35 ve ECER29 yönetmeliklerinin gerekliliklerini karşılayacak şekilde yapılmıştır. Tasarım sonrasında sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmiştir. Analiz sonucunun üretilen prototip üzerinde deneysel olarak yapılan testler ile de doğrulaması gerçekleştirilmiştir. Deneysel olarak, dayanıklılık testleri, yorulma testi, korozyon testi ve vibrasyon testi uygulanmıştır. Elde edilen veriler incelendiğinde, sürekli çalışma öncesi ve sonrasında 2.000 N kuvvet uygulanması sonucu herhangi bir işlevsel arıza ve fonksiyon kaybı meydana gelmemiştir. Validasyon testinde gerçekleştirilen 10.000 çevrim sonrasında parçada bozulma, kırık, çatlak ve fonksiyon kaybı oluşmamıştır. Gerçekleştirilen tasarımın uygunluğu kanıtlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Fren Pedalı, Sayısal Analiz, Yorulma Testi, Vibrasyon Testi, Tasarım

1. GİRİŞ

Ağır vasıta araçların kara yolu taşımacılığında kritik bir konuma sahip olduğu bilinmektedir. Kamyon veya çekiciler gibi ağır vasıta araçların etkin kullanımı ekonomik açıdan önem arz etmektedir. Bunun yanı sıra trafik güvenliği, sürdürülebilir ulaşım politikaları ve çevresel etkiler doğrultusunda da kritik olmaktadır [1,2]. Sahip oldukları yüksek taşıma kapasitesi ve operasyon sürelerinin uzun olması sebebiyle tasarım esnasında güvenlik, dayanıklılık gibi faktörler dikkate

alınmaktadır [3]. Fren sistemleri, güvenlik sistemleri içinde en kritik bileşenlerden biri olarak bilinmektedir. Fren pedalına sürücü tarafından uygulanan kuvvet vakum boosterların yardımıyla hidrolik basınç dağıtım mekanizmaları tarafından büyütülerek balatalara aktarılmaktadır [4,5].

Fren pedalı, fren sisteminin merkezinde yer almaktadır. Sürücü kuvvetinin mekanik kuvvete dönüştürülmesinde yer alan birincil eleman olarak tanımlanmaktadır. Fren pedalın geometrik tasarımı, yapısal dayanımı ve araca yerleşimi gibi parametreler konforu, sistem performansını ve güvenliği direkt olarak etkileyebilmektedir [3]. Genel olarak bir fren sistemi fren pedalı, güç ünitesi (booster), hidrolik iletim ve dağıtım ünitesi (fren borusu ve ana silindiri), hidrolik kontrol valfi ve çıkış ünitesinden meydana gelmektedir. Birçok bileşen barındıran fren sistemi için tasarım faktörleri de birden fazla olmaktadır. Bu nedenle tasarım aşaması büyük önem arz etmektedir [6]. Fren pedalı darbe yükü altındaki davranışı nedeniyle tasarım aşamasının en önemli kriterlerinden biri olmaktadır. Pedal parçasının yüksek mukavemet gerektirdiği bilinmektedir [7]. Pedal tasarımı yapılırken mekanik beklentilerin yanı sıra sürücü konfor beklentileri de dikkate alınmaktadır. Bu doğrultuda sürücü kullanım tepkilerinin göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Ayak uzunluğu, sürücü pozisyonu, sürücü hareketleri (kalça, diz ve ayak bileği eklemleri), temas yüzeyi etkileşimleri ve uzun vadeli sürüş gibi parametreler sürücü konforunu etkileyen ergonomik faktörler olarak bilinmektedir [8].

Literatürde fren pedalı üzerine yapılan çalışmaların çoğu ağırlık azaltımı ve yeni malzeme kullanımı kapsamında gerçekleştirilmiştir [4,8-11]. Sapuan [10], yapmış olduğu çalışmada polimer bazlı malzeme ile fren pedalı tasarımını incelemiştir. Gerçekleştirilen tasarımın kabul edilebilir sınırlar içinde kaldığı belirtilmiştir. Dhande ve ark. [8], poliamid malzemeden üretilmiş kompozit fren pedalı üzerine çalışma gerçekleştirmişlerdir. Ek olarak, fren pedalının temel profili üzerine farklı parametrelerde denemeler gerçekleştirmişlerdir. Çalışma sonucunda, seçilen malzeme ve parametrelerin maliyet tasarrufu sağlayacağını bildirmişlerdir. Sudin ve ark. [11] yaptıkları

çalışmada fren pedalını optimize etmek amacıyla topoloji optimizasyonunu kullanmışlardır. Çalışma kapsamında pedal ağırlığının azaltılması amaçlanmıştır. Çalışma sonucunda ağırlığın %22 oranında azaltıldığı, iyileştirilmiş bir tasarım elde edildiği bildirilmiştir.

Gerçekleştirilen bu çalışmada ağır vasıta araçları için tasarlanan fren pedalı prototip üretimi yapılmış ve testler ile doğrulaması sağlanmıştır. Literatürdeki çalışmalardan farklı olarak, montaj süresinin kısaltılması ve ses oluşumunun azaltılması / önlenmesi amacıyla yeni bir tasarım ile üretilen fren pedalı kompleksinin incelemesi yapılmıştır.

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Çalışma kapsamında tasarımı AKA Otomotiv tarafından gerçekleştirilmiş bir fren pedalının tasarım, prototip üretim, sayısal analiz ve fiziksel doğrulama aşamaları incelenmiştir. Tasarım aşamasında, başlangıç olarak patent/literatür incelenmiş, benchmark yapılmış ve geçmiş hatalar belirlenmiştir. Ardından tasarım istekleri kararlaştırılmıştır. Bir boyutlu (1B) matematiksel modelleme ve taslak tasarım yapılmıştır. Bu süreci tasarımın çevresel parçalar & montajlanabilirlik açısından şekillendirilmesi takip etmiştir. Tasarımın sayısal analizi gerçekleştirilmiş, iterasyon yapılmış ve malzeme seçimi sonrası prototip üretim tamamlanmıştır. Parçaya fiziksel testler uygulanmış ve elde edilen sonuçlar ile analiz sonuçları karşılaştırılmıştır.

Üretilen pedalın performansını incelemek amacıyla ömür (dayanıklılık) testi, koruma (safeguard) testi, misuse testi, korozyon testi, vibrasyon (titreşim) testi olmak üzere fiziksel testler gerçekleştirilmiştir. Fiziksel test prosedürleri, proje kapsamındaki müşteri gereksinimlerine göre oluşturulmuş özel teknik şartnameler esas alınarak yürütülmüştür. Fren pedalının mekanik olarak ömrünü ölçmek amacıyla ömür (dayanıklılık) testi gerçekleştirilmiştir. Test düzeneğinde 2.001.700 çevrim boyunca fren pedalına yük uygulanıp bırakılması simüle edilmiştir. Test uygulama esnasında 1 çevrim için gerekli adımlar Tablo 1’de verilmektedir.

Tablo 1. Ömür test koşulları

No	Kuvvet (N)	Çevrim	Uygulama Noktası
1	500	140.000	Merkezden
2	650	35.000	Merkezden
3	800	15.000	Merkezden
4	2000	100	Merkezden
5	2000	50	15° Eğimle
6	500	20	Enine
10 takipten sonra, aşağıdaki test döngüleri eklenir			
No	Kuvvet (N)	Çevrim	Sıcaklık

1	500	50.000	-40 °C
2	500	50.000	+80 °C

Koruma testi (safeguard test) 2.001.700 döngü olarak gerçekleştirilen dayanıklılık testine ek olarak pedal kutusuna 2000 N kuvvette 20.000 çevrim yaptırılmıştır. Minimum 10.000 çevrimde pedal kutusunda bozulma, kırılma ve fonksiyon kaybı olmaması beklenmektedir.

Bir diğer dayanıklılık testinde (endurance test) komple pedal kutusu araca montaj pozisyonunda rijit bir test fikstürüne monte edilerek sürekli çalışma öncesi ve sonrasında F 2.000 N kuvvet uygulanarak (0 ° XZ düzlemi) fren pedalı ile yatak plakası arasındaki en dar mesafenin ölçümü yapılmıştır. Her döngüden sonra parça aşınması belirlenmiştir.

Kalıcı deformasyon ve yer değiştirme gibi parametrelerin ölçülmesi ve olası yanlış kullanıcı yüklerini simüle etmek amacıyla ortam sıcaklığında enine ve boylamasına misuse testi yapılmıştır. Enine gerçekleştirilen testte, komple pedal kutusu araca montaj pozisyonunda sabitleme elemanları ile rijit bir tezgâh üzerine monte edilmiştir. Parça dinlenme konumundayken enine ± 400 N kuvvet uygulanmış ve yer değiştirme, kalıcı deformasyon ölçülmüştür. Boylamasına gerçekleştirilen testte ise aynı pozisyonda bulunan parçaya öncelikle boylamasına 2000N uygulanmış, ardından 100 er N artırılarak 2700 N’a kadar teste devam edilmiş, yer değiştirme ve kalıcı deformasyon ölçülmüştür.

Pedalın çevresel etkilere dayanımını ölçmek amacıyla ISO 9227 standardına uygun olarak korozyon testi gerçekleştirilmiştir. 50 ± 5 g/l tuz çözeltisi konsantrasyonu kullanılmıştır. Maruziyet 240 saat için incelenmiştir. 72., 120. Ve 240. saatlerde pas oluşumu olup olmadığı kontrol edilmiştir.

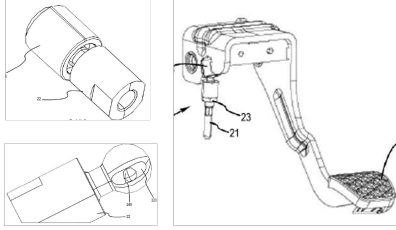
Çalışma koşullarını simüle etmek amacıyla titreşim testi gerçekleştirilmiştir. Fren pedalı numunesine 5-2000 Hz aralığında 1 g-peak ivme ile 1oct/dk tarama hızında 3 eksen rezonans tarama testi yapılmıştır. Ürünün üzerinde 2 noktadan izlem ivme ölçeri ile titreşim test verisi toplanmış ve doğal frekansları belirlenmiştir. Ürün üzerindeki cıvatalar 20 Nm torklanmış. Test sonrasında herhangi bir tork kaybı ve ürün üzerinde mekanik hasarın olup olmadığı göz ile kontrol edilmiş ve kayıtlar altına alınmıştır.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Gerçekleştirilen çalışmada tasarlanan fren pedalı parçasının performansını doğrulamak amacıyla fiziksel testler uygulanmıştır. Tasarım ve testler sonucunda elde edilen veriler aşağıda gösterilmektedir.

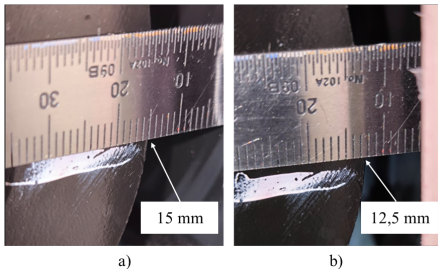
Fren pedal kompleksi 4 tekil 2 kaynaklı olmak üzere 6 parçadan meydana gelmektedir. Frenleme sistemini aktif eden itme çubuğunun montaj

esnasında işlem süresini azaltmak amacıyla yeni bir tasarım geliştirilmiştir. Yapılan yeni tasarımda bağlantı piminin monte edilmesi esnasında pim kendi ekseninde hareket edememekte ancak küresel hareketine devam edebilmektedir. Montaj işlemini tek bir kişi gerçekleştirmektedir. Bağlantı pimi sonrasında somun torklanması esnasında bağlantı piminin kendi ekseninde hareket etmemesi montaj süresini hızlandırmaktadır. Tasarım Şekil 1'de gösterilmektedir.



Şekil 1. Pedal tasarımı

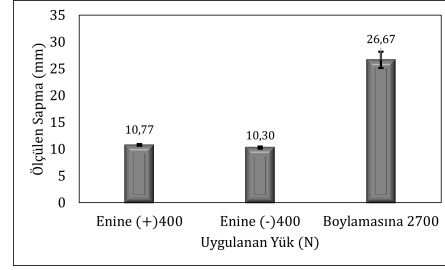
Endurance testte fren pedalı ve yatak plakası arasındaki mesafe ölçülmüştür. İşlevsel arızaya ve gürültüye izin verilmemektedir. Gerçekleştirilen testte fren pedalının tam strok konumunda yatak plakasına temas edip etmediği incelenmiştir. Pedala uygulanan maksimum kuvvet sonrasında kitlenme noktasında pedal ile yatak plakası arasındaki mesafe ölçümü gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 3'te gösterilmektedir. Test sonrasında herhangi bir işlevsel arıza ve fonksiyon kaybı meydana gelmemiştir. (0 ° XZ düzlemi) fren pedalı ile yatak plakası arasındaki en dar mesafenin ölçümü sonuçları test öncesi 15 mm test sonrası 12,5 mm olarak elde edilmiştir.



Şekil 3. Endurance test öncesi ve sonrası fren pedalı ile yatak plakası arası mesafe a) test öncesi, b) test sonrası

Kalıcı deformasyon ve yer değiştirme gibi parametrelerin ölçülmesi amacıyla gerçekleştirilen enine ve boylamasına misuse testinin fiziksel ve analiz sonuçları aşağıda verilmektedir.

Şekil 4'te enine ve boylamasına gerçekleştirilen test sonucu elde edilen sapma verileri gösterilmektedir. Enine +400N yük uygulama sonucunda 10,8 mm sapma meydana gelmiştir. Enine -400N yük uygulama sonrasında ise 10,3 mm sapma oluşmuştur. Boylamasına uygulama sonrasında 26,67 mm sapma meydana gelmiştir.

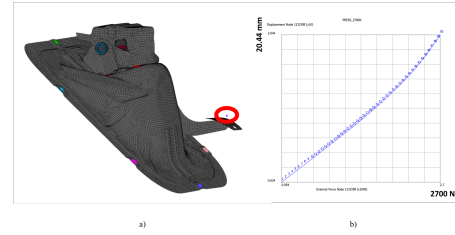


Şekil 4. Enine ve boylamasına misuse test sonuçları

Tablo 2. Enine uygulama CAE sonuçları

Ölçülen Değer	Enine (+) 400 N Uygulama	Enine (-) 400 N Uygulama
Maks. Sapma (mm)	9,38	9,44
Kalıcı Deformasyon (mm)	0	0

Enine (yatay) uygulama için analiz de gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 2'de verilmektedir. Analiz sonucunda pozitif yükte 9,38 mm, negatif yükte ise 9,44 mm sapma meydana gelmiştir. Fiziksel olarak gerçekleştirilen test sonuçları birbirine yakın olarak elde edilmiştir.



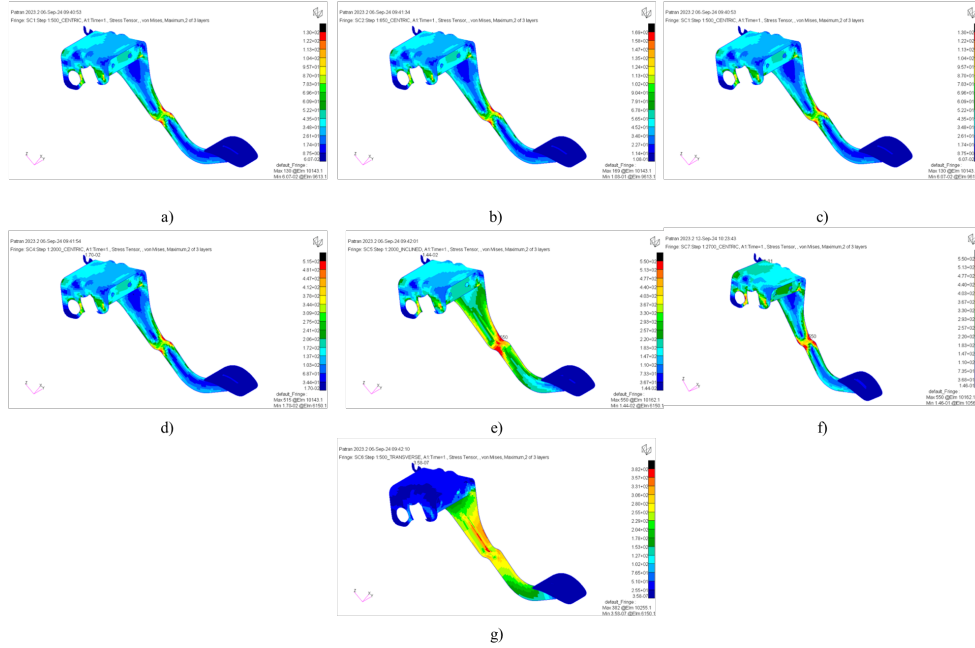
Şekil 5. Boylamasına uygulama CAE sonuçları a) Kuvvet uygulama noktası, b) CAE sonucu

Şekil 5'te boylamasına 2700 N yük uygulama sonrasında meydana gelen sapma için CAE sonucu verilmektedir. Yapılan analiz sonrasında 2700 N'da 20,44 mm sapma meydana gelmiştir. Fiziksel olarak gerçekleştirilen test sonucunda ise sapma değeri 26,67 mm olarak ölçülmüştü. Değer kıyaslandığında yaklaşık %23 sapma meydana geldiği görülmektedir. Aradaki fark test sisteminde meydana gelen toleranslar, sürtünme etkileri ve sınır koşullarındaki farklılıklardan kaynaklanıyor olabilir. Fiziksel ve analiz sonuçlarında sistemde herhangi bir işlev kaybı, kırılma veya çatlama meydana gelmemiştir.

Ömür testinde her çevrim sonrası parçanın fonksiyonel kontrolleri yapılmıştır. Parçada herhangi bir çatlama, kırılma ve gıcırtı, tıkırtı gibi rahatsız edici bir ses meydana gelip gelmediği kontrol edilmiştir. Uygulanan test sonucunda parça fonksiyonlarında uygunsuzluk meydana gelmemiştir. Çatlak, kırık ve rahatsız edici bir ses oluşmadığı tespit edilmiştir.

Tablo 3. Ömür testi CAE sonuçları

Uygulanan Yük (N)	Uygulama Noktası	Maks. Deplasman (mm)	Sol-Sağ Braket Maks. Von Mises Gerilimi (Mpa)	Pedal Maks. Von Mises Gerilimi (Mpa)	Ana Braket Maks. Von Mises Gerilimi (Mpa)	Kaynak Bölgesi Maks. Von Mises Gerilimi (Mpa)
500	Merkezden	2,51	124	130	171	112
650	Merkezden	3,28	162	169	198	145
800	Merkezden	4,07	200	208	210	178
2000	Merkezden	12,94	416	515	216	425
2000	15° Eğimle	17,58	420	550	215	482
2700	Merkezden	27,52	420	550	224	512
500	Enine	11,19	298	382	102	236



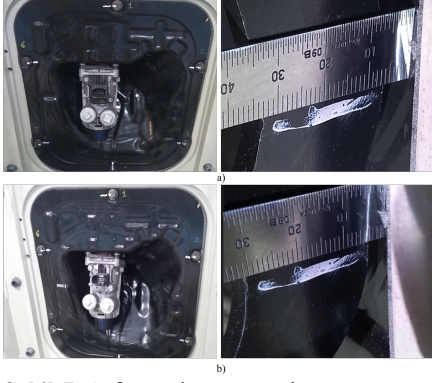
Şekil 6. Ömür testi pedal parçasının farklı yükler altındaki analiz sonuçları; a) merkezden 500 N uygulama, b) merkezden 650 N uygulama, c) merkezden 800 N uygulama, d) merkezden 2000 N uygulama, e) 15 ° eğimle 2000 N uygulama, f) merkezden 2700 N uygulama, g) enine 500 N uygulama

Ömür testinin sayısal analizi gerçekleştirilmiş, sonuçlar Tablo 3 ve Şekil 6’da verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, 500 N, 650 N, 800 N merkezden ve 500 N enine yapılan uygulamalar sonucunda elde edilen stres seviyelerinin ilgili malzemelerin akma mukavemetinin altında kalmaktadır. Bu doğrultuda yapının lineer elastik bölgede davranış sergilediğini söylemek mümkündür. Merkezden 2000 N, 15° eğimden 2000 N ve merkezden 2700 N uygulamalarında ise malzeme akma değerlerinin üzerinde kaydedilen durumlar meydana gelmiştir. Ancak bu durumun ömür üzerindeki etkisi ilgili çevrim sayılarının düşük olmasıyla nedeniyle sınırlı olarak değerlendirilmiştir. Bu doğrultuda tekrarlı yükler altında yapının güvenli alanda kalacağını söylemek mümkündür.

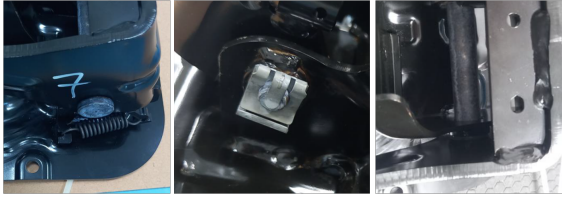
Fiziksek olarak gerçekleştirilen ömür testinde her çevrim sonrası parçanın fonksiyonel kontrolleri yapılmıştır. Parçada herhangi bir çatlama, kırılma

ve gıcırtı, tıkırtı gibi rahatsız edici bir ses meydana gelip gelmediği kontrol edilmiştir. Uygulanan test sonucunda parça fonksiyonlarında uygunsuzluk meydana gelmemiştir. Çatlak, kırık ve rahatsız edici bir ses oluşmadığı tespit edilmiştir.

Ömür testi sonrasında uygulanan safeguard test sonrasında pedal kutusu görselleri Şekil 7’de verilmektedir. Test öncesi ve sonrası pedal kutusu incelendiğinde 20.000 döngüden sonra arıza, fonksiyon kaybı olmadığı görülmektedir.

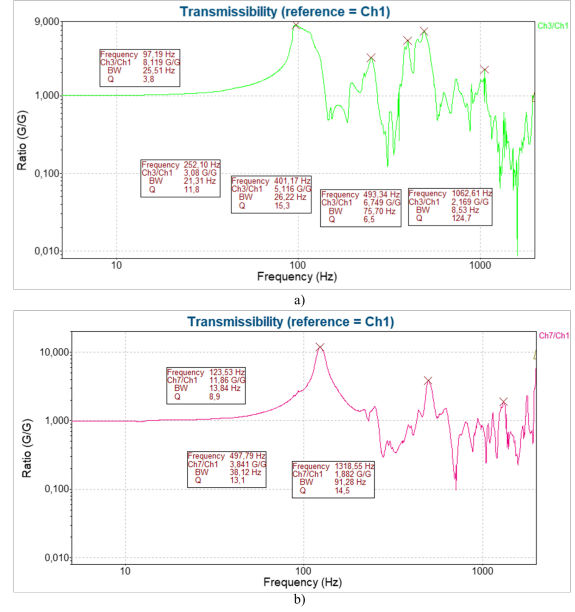


Şekil 7. Safeguard test öncesi ve sonrası pedal kutusu a) test öncesi, b) test sonrası



Şekil 8. Korozyon testi sonrası pedal kutusunun görüntüleri

Şekil 8’de korozyon testi sonrasında pedal kutusunun görüntüleri verilmektedir. Korozyon testi 240 saat boyunca devam ettirilmiştir. Test tuz çözeltisi konsantrasyonu 50 ± 5 g/L değerinde, 23°C ’de 6,0-7,5 ph aralığında, 1 bar hava basıncında gerçekleştirilmiştir. Test başlatıldıktan sonra 72. saatte beyaz pas kontrolü, 240. saatte ise kırmızı pas kontrol edilmiştir. Görseller incelendiğinde korozyon meydana gelmediği, pas oluşumu gözlenmediği söylenebilmektedir. Fren pedalı prototipi üzerinde 5–2000 Hz frekans aralığında, 1 g-peak ivme ile rezonans tarama testi gerçekleştirilmiştir. Test kapsamında üç eksen (X, Y, Z) ayrı ayrı incelenmiş ve ürünün doğal frekansları transmissibility (G/G) grafikleri üzerinden belirlenmiştir. Şekil 9, Şekil 10 ve Şekil 11’de X, Y, Z eksenleri için transmissibility grafikleri, Tablo 4, Tablo 5 ve Tablo 6’te ise grafik verileri gösterilmektedir.

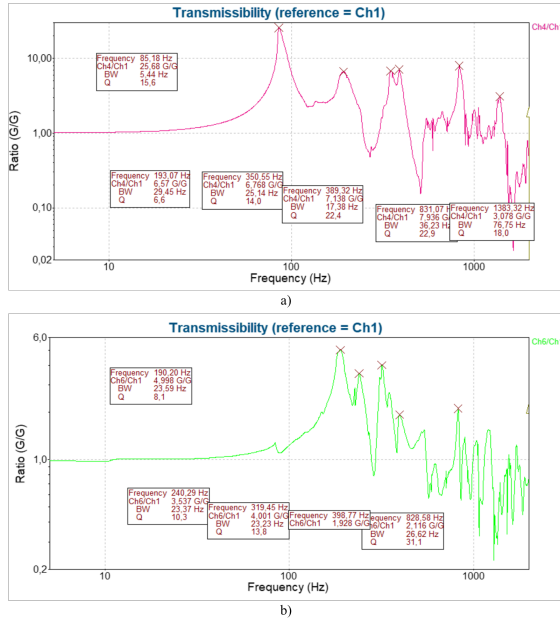


Şekil 9. X eksenli rezonans tarama test grafikleri a) 1. izleme ivmeölçerinden elde edilen veriler, b) 2. izleme ivmeölçerinden elde edilen veriler

Tablo 4. X eksenli rezonans tarama test verisi

Eksen	Frekans (Hz)	Ratio (G/G)	BW (Hz)	Q (Hz)
X (1. İzleme İvmeölçer)	97,19	8,119	25,51	3,8
	252,1	3,08	21,31	11,8
	401,17	5,116	26,22	15,3
	493,34	6,749	75,7	6,5
	1062,61	2,169	8,53	124,7
X (2. İzleme İvmeölçer)	123,53	11,86	13,84	8,9
	497,79	3,841	38,12	13,1
	1318,55	1,882	91,28	14,5

X ekseninde 97 Hz’de (8,1 G/G) ve 493 Hz’de (6,7 G/G) güçlü rezonans davranışları belirlenmiş, özellikle 97 Hz düşük frekanslı bir mod olarak öne çıkmıştır. İkinci izleme ivmeölçerinde 123 Hz’de 11,8 G/G değerine ulaşılmıştır. Bu sonuç, X ekseninde hem düşük hem orta frekansta kritik modların mevcut olduğunu göstermektedir.

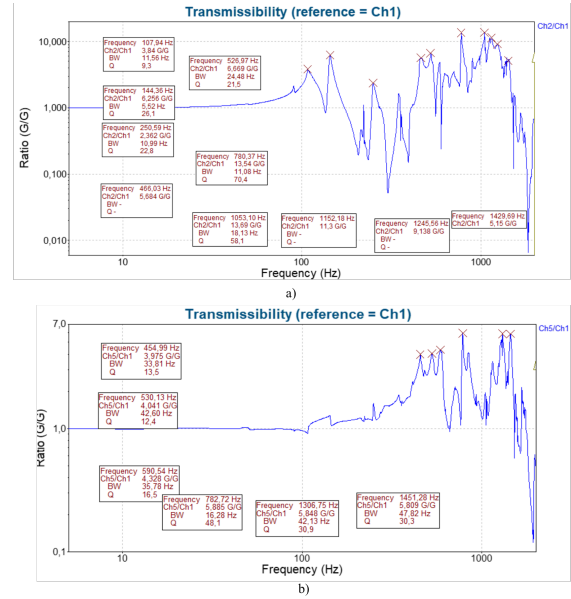


Şekil 10. Y eksenli rezonans tarama test grafikleri a) 1. izleme ivmeölçerinden elde edilen veriler, b) 2. izleme ivmeölçerinden elde edilen veriler

Tablo 5. Y eksenli rezonans tarama test verisi

Eksen	Frekans (Hz)	Ratio (G/G)	BW (Hz)	Q (Hz)
Y (1. İzleme İvmeölçer)	85,18	25,68	5,44	15,6
	193,07	6,57	29,45	6,6
	350,55	6,768	25,14	14
	389,32	7,138	17,38	22,4
	831,07	7,936	36,23	22,9
	1383,32	3,078	76,75	18
Y (2. İzleme İvmeölçer)	190,2	4,998	23,59	8,1
	240,29	3,537	23,37	10,3
	319,45	4,001	23,23	13,8

Y ekseninde özellikle 350 Hz (6,7 G/G) 389 Hz (7,1 G/G) ve 831 Hz (7,9 G/G, Q=22,9) frekanslarında belirgin rezonans davranışları kaydedilmiştir. 831 Hz'deki yüksek Q değeri, bu ekseninde keskin bir rezonans davranışına işaret etmektedir. Bu sonuçlar Y ekseninde orta-yüksek frekanslı titreşimlere karşı hassasiyetin yüksek olduğunu göstermektedir.



Şekil 11. Z eksenli rezonans tarama test grafikleri a) 1. izleme ivmeölçerinden elde edilen veriler, b) 2. izleme ivmeölçerinden elde edilen veriler

Tablo 6. Z eksenli rezonans tarama test verisi

Eksen	Frekans (Hz)	Ratio (G/G)	BW (Hz)	Q (Hz)
Z (1. İzleme İvmeölçer)	107,94	3,84	11,56	9,3
	144,36	6,256	5,52	26,1
	250,59	2,362	10,99	22,8
	466,03	5,684	-	-
	526,97	6,669	24,48	21,5
	780,37	13,54	11,08	70,4
	1053,1	13,69	18,13	58,1
	1152,18	11,3	-	-
	1245,56	9,138	-	-
	1429,69	5,15	-	-
Z (2. İzleme İvmeölçer)	454,99	3,975	33,81	13,5
	530,13	4,041	42,6	12,4
	590,54	4,328	35,78	16,5
	782,72	5,885	16,28	48,1
	1306,75	5,848	42,13	30,9
	1451,28	5,809	47,82	30,3

Z ekseninde çok sayıda güçlü rezonans tespit edilmiştir. Özellikle 780 Hz'de 13,5 G/G, 1053 Hz'de 13,6 G/G ve 1152 Hz'de 11,3 G/G değerleri kritik büyütmelere işaret etmektedir. Q değerlerinin 9–70 arasında çıkması, bu eksenin rezonansa karşı en keskin ve en hassas davranışı gösterdiğini ortaya koymaktadır. Z eksenli tasarım açısından en kritik yön olarak değerlendirilebilmektedir. Parçanın çalıştığı yer itibarıyla rezonansa girmemesi için 1. doğal frekansının 25 Hz'den büyük olması gerekmektedir. Vibrasyon testi sonucunda tüm eksenler için ilk doğal frekans değerleri 25 Hz'den yüksek olarak elde edilmiştir. Yapılan fiziksel testler sonucunda değerlerin uygun olduğunu söylemek mümkündür. Parçanın güvenli bölgede olduğu anlaşılmaktadır.

4. SONUÇLAR

Çalışma kapsamında ağır vasıta araçlar için tasarlanan fren pedalı bilgisayar destekli analiz ve fiziksel testler ile değerlendirilmiştir. Tasarımda yapılan yenilikler montaj kolaylığı sağlanması ve bu doğrultuda montaj süresinde azalma olması, ses oluşumunun azaltılması/önlenmesi gibi iyileştirmeler içermektedir. İlgili tasarım patent ile korunmaktadır.

Fiziksel test sonuçları incelendiğinde;

- Ömür (dayanıklılık) testinde 2 milyon üzerinde çevrim sonucunda pedalda fonksiyon kaybı meydana gelmemiştir. Çatlak veya kırık oluşmamıştır.
- Misuse test sonucunda yükleme koşulları altında kalıcı hasar meydana gelmediği ortaya konulmuştur.
- 240 saatlik korozyon testi sonucunda parçada korozyon meydana gelmediği görülmüştür.
- Vibrasyon testi sonucunda tork kaybı, bağlantı gevşemesi veya mekanik hasar meydana gelmemiştir. Tüm eksenler için ilk doğal frekans değerleri 25 Hz'den yüksek olarak elde edilmiştir. Parçanın güvenli bölgede olduğu anlaşılmaktadır.

Fiziksel test sonuçları, tasarımın dayanıklılık, titreşim ve korozyon açısından operasyonel şartlara uygun olduğunu göstermektedir.

5. REFERANSLAR

- [1] McKinnon, A. (2010). Environmental sustainability. *Green logistics: improving the environmental sustainability of logistics*. London.
- [2] Rodrigue, J. P. (2020). *The geography of transport systems*. Routledge.
- [3] Reimpell, J., Stoll, H., & Betzler, J. (2001). *The automotive chassis: engineering principles*. Elsevier.
- [4] Ergenc, A. F., Ergenc, A. T., Kale, S., Sahin, I. G., Dagdelen, K., Pestelli, V., ... & Kuday, B. (2017). Reduced weight automotive brake pedal test & analysis. *International Journal of Automotive Science and Technology*, 1(2), 8-13.
- [5] Abeyasiriwardhana, W. S. P., & Abeykoon, A. H. S. (2021). Brake by wire control with pedal feedback and brake boost. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, 10(6), 3042-3051.
- [6] Lee, S. H., Park, T. W., Jung, I. H., & Seo, J. H. (2004). Development of Automotive Braking Performance Analysis Program Considering Dynamic Characteristic. *Trans. KSAE*, 12(2), 175-181.
- [7] Scheitlin, M. (2011). Renewable Energy Vehicle Project: Pedal Box Design for Formula SAE. *The University of Western Australia*.
- [8] Dhande, K. K., Jamadar, N. I., & Ghatge, S. (2014). Design and analysis of composite brake pedal: an ergonomic approach. *Int. J. Mech. Eng. & Rob. Res*, 3(3).
- [9] Jung, I., Lee, S., Seo, J. H., & Park, T. W. (2004). Development of automotive braking performance analysis program considering dynamic characteristics. *Trans. Korean Society of Automotive Engineers*, 12(2), 175-181.
- [10] Sapuan, S. M. (2005). A conceptual design of the concurrent engineering design system for polymeric-

based composite automotive pedals. *American Journal of Applied Sciences*, 2(2), 514-525.

[11] Sudin, M. N., Tahir, M. M., Ramli, F. R., & Shamsuddin, S. A. (2014). Topology optimization in automotive brake pedal redesign. *International Journal of Engineering and Technology (IJET)*, 6(1), 398-402.

MACPHERSON SÜSPANSİYON SİSTEMİNE AİT SALINCAĞIN TERMO- MEKANİK DEFORMASYON DAVRANIŞININ SONLU ELEMANLAR VE DENEYSEL İNCELENMESİ

Mehmet Fatih ERCAN¹, Mert ILGIN², Ali Baran METE³, Tuba TELLİ⁴

¹OSKİM Otomotiv Sanayi ve Ticaret A.Ş., Yeşil (530) Cad. No: 9/1 TÜRKİYE

Tel: 224 493 24 16 E-Posta: mehmetfatihercan@oskimautomotive.com

²OSKİM Otomotiv Sanayi ve Ticaret A.Ş., Yeşil (530) Cad. No: 9/1 TÜRKİYE

Tel: 224 493 24 16 E-Posta: mertilgin@oskimautomotive.com

³NETFORM Mühendislik Makine Metal, Bayraklı No: 288/5 TÜRKİYE

Tel: 232 373 77 11 E-Posta: abmete@netformmetal.com

⁴OSKİM Otomotiv Sanayi ve Ticaret A.Ş., Yeşil (530) Cad. No: 9/1 TÜRKİYE

Tel: 224 493 24 16 E-Posta: tubatelli@oskimautomotive.com

Özet- Bu çalışmada, MacPherson süspansiyon sistemine ait salıncağın kaynak sonrasında oluşan deformasyonlarının sonlu elemanlar yöntemiyle analiz edilerek, deneysel sonuçlarla karşılaştırılması üzerine bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Süspansiyon sistemi, yoldan gelen titreşim ve darbeleri absorbe ederek sürüş güvenliği ile konforu sağlayan aracın en kritik sistemlerinden bir tanesidir. Farklı elemanlardan oluşan süspansiyon sisteminin en kritik parçalarından biri salıncaktır. MacPherson süspansiyon yapısında alt salıncak, tekerleğin şasiye bağlantısını sağlayan ve aracın yol tutuşunu, konforunu ve güvenlik performansını doğrudan etkileyen bir elemandır. Salıncağın araç üzerine doğru şekilde monte edilebilmesi için, referans geometrik değerlerin belirli tolerans sınırları içerisinde kalması gerekmektedir. Çelik sac malzeme kullanılarak üretilen salıncaklarda, kaynak işlemi sırasında oluşan ısı etkileri nedeniyle çarpılmalar meydana gelmektedir ve bu durum montaj toleranslarının aşılmasına neden olmaktadır. Özellikle, ticari araçlarda kullanılan salıncaklarda kaynak dikiş boyunun uzun olması, çarpılma miktarını daha da artırmaktadır. Bu durum, salıncağın araç üzerine montajı sağlanamamaktadır. Kaynak yolunun optimizasyonu birçok değişken barındırdığından, bu süreç yüksek maliyetli ve zaman alıcı olabilmektedir. Süre kaybını ve üretim maliyetlerini azaltmak amacıyla bu çalışmada sonlu elemanlar yöntemiyle kaynak analizi gerçekleştirilmiş ve sonuçlar deneysel bulgularla karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırmalar sonucunda, sonlu elemanlar yöntemi ve deneysel

sonuçları arasındaki farkın %10'un altında olduğu belirlenmiş olup, bu durum sonlu elemanlar yöntemiyle modellemenin doğruluğunu ve güvenilirliğini desteklemiştir.

1. GİRİŞ

Süspansiyon sistemi, sürüş güvenliği ve konforu üzerinde doğrudan etkilidir. Yoldan gelen bozucu etkiler, hızlanma, frenleme ve virajdan kaynaklanan yüklemeler süspansiyon sistemi üzerinde yüklemelere neden olmaktadır. Konfor ve emniyetin sağlanabilmesi amacıyla bu etkilerin absorbe edilmesi ve alt sistemlerin dayanıklı olması mühimdir.

MacPherson süspansiyon sistemi farklı alt sistemlerden oluşmaktadır. Bu alt sistemlerden en kritik öneme sahip parçası salıncaktır. Salıncak, tekerlek ile şase arasındaki bağlantıyı sağlamaktadır. Salıncak, aracın yol tutuşu, konforu ve sürüş güvenliği üzerindeki etkisi nedeniyle emniyet parçasıdır.

Salıncakta malzeme olarak, dökme demir, alüminyum ve çelik kullanılmaktadır. En yaygın olarak kullanılan malzeme olarak çelik kullanılmaktadır. Kullanılan araca göre, salıncak birden fazla parçadan oluşmaktadır ve bu parçalar kaynak yöntemi kullanılarak birleştirilmektedir. Salıncak emniyet parçası olduğundan gelen yüklemelere karşı dayanıklı olmalıdır. Salıncağın dayanımını belirleyen faktörlerden bir tanesi de

kaynak dikişinin düzgün ve tam olarak yapılmasıdır.

Aracın türüne göre salıncak boyutları artmaktadır ve bu durum salıncak elemanları arasında atılan kaynak dikiş boyunun artmasına sebep olmaktadır. Bu durum, ısıl girdileri artırdığından parça üzerinde çarpımlara neden olmaktadır. Bu çarpılma miktarının yüksek olması araç üzerindeki montajına olumsuz etkilemektedir.

Salıncağın araç üzerindeki montajı, salıncak üzerindeki referans olarak alınan ölçülerin belirli bir tolerans dahilinde olmasıyla sağlanmaktadır. Çarpılma miktarının yüksek olması, araç üzerindeki montaj noktalarına uyumlu olmayacağından parçanın kullanımı mümkün olmayacaktır. Salıncak, kaynak sonrası, belirlenen toleranslar dahilinde olması gerekmektedir.

Özellikle, kaynak dikiş boyunun uzun olması çarpılma miktarını artırmaktadır. Ayrıca, kaynak dikiş sayısının artması da kaynak yolunun optimizasyonu için gerekli zaman ve maliyet kaybına yol açmaktadır.

Kaynak sonrası oluşan termo-mekanik çarpımların azaltılmasında en etkili stratejilerden biri, kaynak yolunun optimizasyonudur. Bu doğrultuda, Kim vd. [1], arka denge kolunun MIG ark kaynağı için termo-elasto-plastik (TEP) sonlu eleman modeli oluşturularak, sıcaklık alanı-artık gerilme-çarpılma ilişkisini göstermiştir. Sabitleme elemanı ve klemp koşullarının ve dikiş sırasının montaj toleranslarına etkisini, sayısal ve deneysel olarak ortaya koymuştur. Bulgular, ince sac ve uzun dikişli alt salıncak benzeri parçalarda kaynak başlangıç ve bitiş konumları ile sekansın kritikliğini doğrulamıştır.

Kasim vd. [2], alt salıncak parçasının farklı kaynak yollarının çarpılmaya olan etkisini incelemiştir. FEM tabanlı simülasyon sonuçlarını, deneysel ölçümlerle doğrulamıştır. Dikiş sırasının eğilme ve açılma çarpılma bileşenlerini belirgin düzeyde değiştirdiğini göstermiştir.

Romero vd. [3], çok dikişli levha ve braket geometrilerinde kaynak sırası optimizasyonunu pekiştirmeli öğrenme (Q-learning) ile ele almıştır. Bu yaklaşımla, büyük kombinatoriyal sıralama uzaylarının pratik sürede taranabileceğini göstermiştir.

Wang vd. [4], ince sac uygulamalarında deformasyon minimizasyonu için sekans-segmentasyon ve klemp stratejilerinin birlikte ele alınması gerektiğini vurgulamıştır.

Islam vd. [5], sonlu elemanlar analizini takiben yanıt yüzeyi yöntemi ve bunu izleyen genetik algoritma ile lap fillet ark kaynağında proses parametrelerini (gerilim, akım, hız, yön) çarpılmayı minimize edecek şekilde optimize etmişlerdir.

2. MATERYAL VE METOT

Çalışmada referans olarak hafif ticari bir araca ait L geometri şeklinde bir salıncak parçası kullanılmıştır. L geometri salıncak parçasının imalatında 2 adet ST-37 boru parça ve 2 adet alt/üst sac parçalar kullanılmaktadır. Kullanılan sac malzemelerin kalınlığı 2.5 mm üst ve 3 mm alt sac kalınlığı olarak kullanılmıştır. Bu parçanın temsil görseli Şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1. Çalışmada kullanılan salıncak modeli

Bu parçaların imalatı borular dikişli boru ve sac lar ise tandem kalıplarla soğuk şekillendirme yapılarak imal edilmektedir. Kesim proseslerinde endüstriyel 6 kW lazer kesim makineleri kullanılmıştır. Şekillendirme proseslerinde ise endüstriyel 800 ton hidrolik preslerden destek alınmıştır. Şekillendirilen sac lar Gaz Altı MIG/MAG kaynağı ile robotik kaynak prosesleriyle imal edilmiştir. Parçaların kaynak parametreleri endüstriyel robotik sistemlere uygun kaynak makineleri kullanılarak belirlenmiş ve Magmaweld kaynak veri toplama sistemi ile hedef parametrelerin doğrulanması ve kaynak parametrelerinin toplanması sağlanmıştır. Sistemin bir görseli Şekil 2’de verilmiştir.

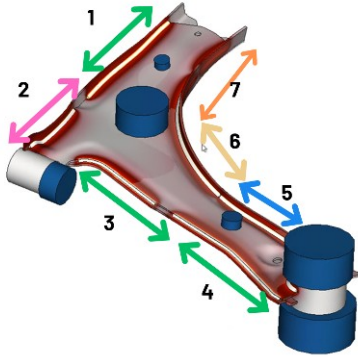


Şekil 2. Magmaweld MagNET veri toplama sistemi

Çalışmada ilk imal edilen salıncaklardan veriler alındıktan sonra parçanın simülasyon ortamında kullanılabilecek şekilde modellenmesi aşamasına geçilmiştir. Bu aşamada parçanın katı modelinin oluşturulması için CATIA V5, MSC Apex ve Solidworks yazılımları kullanılmıştır. Bu yazılımlarla oluşturulan ve temizlenen katı model kaynak simülasyonlarının yapılabilmesi için Simufact Welding ortamına aktarılmıştır.

Toplanan kaynak parametreleri akım, kaynak hızı ve voltajdır. Bunların sonlu elemanlar yazılımları ortamında simüle edilmesi için Simufact Welding 2025.3 yazılımı kullanılmıştır. Yazılım üzerinde uzun olan kaynaklar bölümlendirilerek çarpılmaya sebep olduğu bilinen 7 adet gövde kaynağı tanımlanmıştır. Şekil 3'te katı model görseli ve modellenmek istenen kaynak simülasyonu verilmiştir. Mavi ile gösterilen parçalar fikstür sabitleme noktalarını gösterirken kırmızı olan bölgeler ise kaynak noktalarını belirtmektedir.

Toplanan kaynak parametreleri akım, kaynak hızı ve voltajdır. Bunların sonlu elemanlar yazılımları ortamında simüle edilmesi için Simufact Welding 2025.3 yazılımı kullanılmıştır. Yazılım üzerinde uzun olan kaynaklar bölümlendirilerek çarpılmaya sebep olduğu bilinen 7 adet gövde kaynağı tanımlanmıştır. Şekil 3'te katı model görseli ve modellenmek istenen kaynak simülasyonu verilmiştir. Mavi ile gösterilen parçalar fikstür sabitleme noktalarını gösterirken kırmızı olan bölgeler ise kaynak noktalarını belirtmektedir.



Şekil 3. Parça katı modelinin oluşturulması ve kaynak numaralandırma çalışması

Kaynak tanımlamaları yapıldıktan sonra gerçek üretim şartlarında elde edilmiş parça ile parametrelerin eşleştirilmesi için veri toplama sisteminden alınan kaynak parametreleri yazılım üzerinde girilmiştir.

190 A, 23 V, ve 9 mm/s kaynak hızı olarak elde edilen kaynak parametreleri simülasyon yazılımına girildikten sonra çarpılmaların analiz edilebilmesi için analizler koşturulmuştur. Analiz sonuçları parçanın rotül ve boru kısımlarındaki deformasyon farklarıyla incelenmiştir.

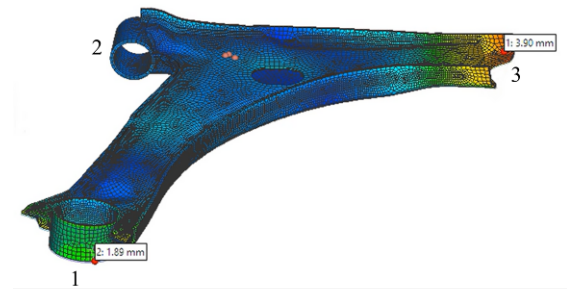
Analiz sonuçlarından sonra elde edilen gerçek üretim şartlarındaki ürünün ölçüsel kontrolü Hexagon CMM cihazıyla ölçülmüş ve kıyaslamalar yapılmıştır.

3. BULGULAR

3.1 Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Analiz Sonuçları

Salıncak kaynak analizi, robot kaynakta ürünün kaynak edilme prosesi modellenerek gerçekleştirilmiştir. Kaynak parametreleri, kaynak yolu ve fikstür modeli Simufact Welding programında tanımlanmıştır. Simufact welding programında kaynak penetrasyonu gerçek sonuçlarla kıyaslanarak kaynak dikiş boyutu belirlenmiştir.

Şekil 4'te kaynak analizi sonucunda salıncak üzerindeki çarpılma miktarı gösterilmiştir. Şekil 4'te 1 bölgesi büyük boru bölgesi, 2 küçük boru bölgesi ve 3 ise rotül bölgesi olarak tanımlanmıştır.



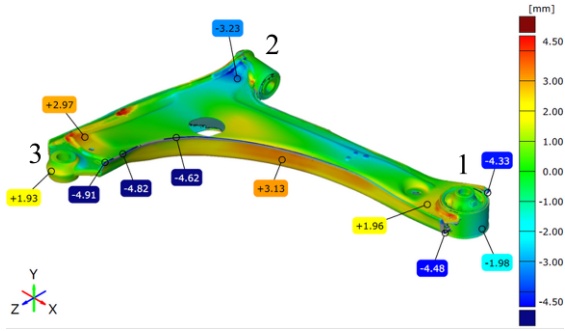
Şekil 4. Sonlu Elemanlar Analizi salıncak çarpılma miktarı

Şekil 4 incelendiğinde, en yüksek çarpılma miktarlarının büyük boru bölgesi (1) ve rotül bölgesinde (3) olduğu gözlenmiştir. Referans olarak kabul edilen büyük boru bölgesinden alınan ölçüm sonucunda, 1.89 mm'lik bir çarpılma miktarının olduğu tespit edilmiştir. Analiz sonucunda, en yüksek çarpılma miktarının rotül bölgesinde olduğu ve klemplerin etki ettiği alanda ise en düşük çarpılma miktarının olduğu gözlenmiştir.

3.2 Deneysel Analiz Sonucu

Salıncak kaynak testleri belirlenen şartlar doğrultusunda gerçekleştirilmiştir. Salıncak kaynağı esnasında veri toplama sisteminden elde edilen veriler kayıt altına alınmıştır. Kaynak işlemi tamamlandıktan sonra operatörün normal prosedürü gözlem edilerek elde edilen sonuçlar, sonlu elemanlar programında modellenmiştir.

Şekil 5'te kaynağı tamamlanmış salıncak parçasının orijinal parça ile kıyaslanması gösterilmiştir.



Şekil 5. Salıncak deneysel çarpılma miktarı

Şekil 5 incelendiğinde, en yüksek çarpılma miktarı rotıl bölgesinde olduğu tespit edilmiştir. Referans olarak kabul edilen büyük boru (1) bölgesinde, çarpılma miktarının 1.98 mm olduğu tespit edilmiştir. En düşük çarpılma miktarı, klemplerin etki ettiği alanlarda olduğu gözlenmiştir.

4.SONUÇ

Kaynak sırasında oluşan ısıl girdiler sonucunda oluşan çarpılma, kaynak yolu optimizasyonu, kaynak parametrelerinin optimizasyonu ve fikstürün optimizasyonu minimize edilebilmektedir. Parametrelerin optimizasyonu deneysel olarak tespit edilmesi zaman ve maliyet kayıplarına neden olmaktadır. Bu durum, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak, zaman ve maliyet kayıpları önüne geçilebilmektedir.

Salıncak kaynak analizi, deneysel sonuçların modellenmesiyle gerçekleştirilmiştir. Analiz sonucunda, referans olarak kabul edilen bölgede oluşan çarpılma miktarının 1.89 mm olduğu tespit edilmiştir. En yüksek çarpılma bölgeleri büyük boru ve rotıl bölgesinde olduğu gözlenmiştir. En yüksek çarpılma miktarı rotıl bölgesinde oluşmuştur.

Salıncanın kaynak sonucunda elde edilen parçanın orijinal parça ile kıyaslanması sonucundan en yüksek çarpılma miktarlarının büyük boru ve rotıl bölgesinde olduğu gözlenmiştir. Referans olarak kabul edilen büyük boru bölgesinde oluşan çarpılma miktarın 1.98 mm olduğu tespit edilmiştir. En yüksek çarpılma miktarı rotıl bölgesinde olduğu gözlenmiştir.

Sonlu elemanlar ve deneysel sonuçların birbirleriyle uyumlu olduğu gözlenmiştir. İki yöntem sonucunda, elde edilen en yüksek çarpılma miktarı rotıl bölgesinde oluşmuştur. Referans olarak kabul edilen noktalardaki çarpılma miktarları karşılaştırıldığında 5% bir hata payı elde edilmiştir. Sonuçların birbirleriyle uyumu göz önüne alındığında, kaynak yolu optimizasyonu, kaynak parametrelerinin belirlenmesi ve fikstür

optimizasyonun sonlu elemanlar yöntemiyle optimal olarak elde edilmesinin mümkün olduğunu göstermiştir.

Yapay zekâ algoritmalarının sonlu elemanlar analizine entegre edilmesi, kaynak deformasyonlarının öngörülmesinde daha yüksek doğruluk ve önemli zaman tasarrufu sağlayabilir.

5. REFERANSLAR

- [1] J.J. Kim, M. Bae, M-P. Hong, Y-S. Kim, "Finite Element Analysis on Welding-Induced Distortion of Automotive Rear Chassis Component," *Metals*, 12(2), 287, 2022.
- [2] K.N. Kasim, S.S. Saifuddin, D.P. Ishak, D. Andud, S. Saidin, "Finite Element Analysis of Lower Arm's Welding Distortion Due To Welding Sequence With Experimental Verification,"
- [3] J. Romero-Hdz, B.N. Saha, G. Toledo-Ramirez, I. Lopez-Juarez, "A Reinforcement Learning Based Approach for Welding Sequence Optimization," *Transactions on Intelligent Welding Manufacturing*, 2018.
- [4] X. Wang, X. Zhou, Z. Xia, X. Gu, "A survey of welding robot intelligent path optimization," *Journal of Manufacturing Processes*, 63, 14-23, 2021.
- [5] M. Islam, A. Buijk, M. Rais-Rohani, K. Motoyama, "Process parameter optimization of lap joint fillet weld based on FEM-RSM-GA integration technique," *Advances in Engineering Software*, 79, 127-136, 2015.

JANT İŞLEMESİNDE VERİMLİLİĞİ ARTTIRAN YENİ NESİL BAĞLAMA FİKSTÜRÜ

Osman Kaan AYDIN¹

¹Döktaş Dökümcülük Tic. ve San. A.Ş MOSB, Sakarya Cd. No:9 Manisa/TÜRKİYE
Tel: (0236) 233 80 57 E-Posta: osman.aydin@doktas.com

ÖZET

Bu çalışmada, jant işleminde kullanılan 1. operasyon dik torna fikstürünün tasarımı ve işleme prosesi üzerindeki olumlu çıktıları ele alınmaktadır. Tasarımda, jantın işlenebilmesi için gerekli olan üç adet merkezleme ve üç adet sıkma ayağı bulunmaktadır. Jant referans çemberi iç yüzeyi (merkezleme yapılan yüzey) 10 ° açığa sahip ve standarttır.

Yeni fikstür üzerindeki merkezlemeler de aynı açığa sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Jant referans çemberi ile bir araya geldiğinde açılı yüzeyler her üç merkezleme tarafında tam olarak birbirine oturarak jantı merkeze getirmektedir. Daha sonra jant sıkma ayakları sayesinde parça sabitlenmektedir. Aynı fikstür üzerinde üç farklı ebat jantın bağlanmasını sağlayacak şekilde kademeli olarak tasarlanmıştır. Yapılan tasarımın hareketli sistemi sabit merkezlemeye çevirmek ve kanallı bir tasarım ile referans çemberinin 10° açıdaki iç yüzeyinin tasarlanan kanala oturtulması ve açısı sayesinde merkezlenmesi, hareketli parçaların aşınmasının tamamen ortadan kaldırılması, hareketli parçaların alüminyum talaşı nedeni ile eş çalışmama probleminin önüne geçilmesi ve son olarak sök tak işlemini ortadan kaldırarak aynı fikstür üzerine üç farklı ebattaki jantın bağlanmasını sağlayarak ayar sürelerinin azaltılmasını sağlamıştır.

Üç adet tasarlanan basma takozunun yüzey alanlarını genişleterek çarpılma gibi döküm kaynaklı gelen problemlerin daha kolay tespiti de sağlanmıştır. Bu sayede,

üretim sürecindeki olası hatalar daha erken aşamada belirlenerek, kalite kontrol süreçlerinin etkinliği artırılmıştır. Tüm bu yenilikler ürün kalitesini artırırken, üretim sürecinin verimliliğini de optimize etmektedir. Bu tasarım, jant işleminde önemli bir yenilik sunmakta olup, endüstriyel üretim süreçlerine katkı sağlamaktadır.

Anahtar sözcükler: *Jant, fikstür, işleme, merkezleme.*

1.GİRİŞ

Otomotiv endüstrisinde jant hem fonksiyon ve güvenlik hem de estetik açıdan kritik bir bileşendir. Jant üretiminde talaşlı imalatın ilk adımlarından biri olan dik torna operasyonlarında, kullanılan fikstür tasarımı parçanın merkezlenmesi, sabitlenmesi ve boyutsal hassasiyetinin sağlanması açısından belirleyici bir rol oynamaktadır. Geleneksel sistemlerde yaygın olarak kullanılan hareketli merkezleme mekanizmaları, uzun süreli kullanımlarda aşınma ve talaş sıkışması gibi nedenlerle hassasiyetini kaybetmektedir. Bu durum hem ayar sürelerinin uzamasına hem de işleme sonrası merkezden kaçıklık hatalarının artmasına yol açmaktadır. Ayrıca, farklı jant ebatları için operatör tarafından yapılan sök-tak işlemleri zaman kaybına ve insan hatasına bağlı kalite problemlerine neden olmaktadır.

Literatürde jant işleme fikstürleri üzerine çeşitli çalışmalar bulunuyor olsada, bu çalışmaların önemli bir kısmı çok parçalı ve bakım gerektiren çözümlere odaklanmıştır. Bu

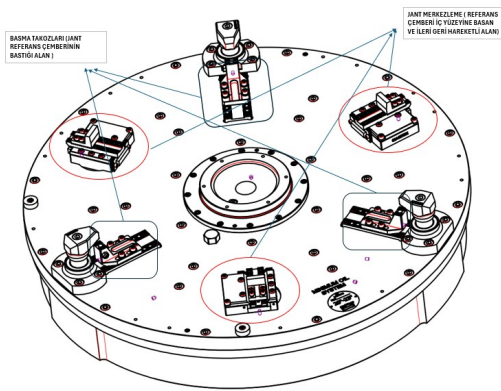
çalışmada ise, hareketli parçaları tamamen ortadan kaldıran, sabit merkezleme prensibine dayalı ve çok ebatlı kullanıma olanak tanıyan yenilikçi bir ayna tasarımı geliştirilmiştir.

2. MEVCUT SİSTEM

Mevcut durumda kullanılan ayna tasarımı, üç adet basma takozu ve üç adet hareketli merkezleme elemanından oluşmaktadır. Merkezleme elemanları, jant referans çemberinin iç yüzeyine temas ederek parçayı merkezlemekte, yaylı mekanizma ise bu temasın sürekliliğini sağlamaktadır.

Ancak bu sistemde, uzun süreli kullanımlarda meydana gelen aşınmalar ve talaş sıkışmaları nedeniyle merkezleme elemanları eş çalışmamaktadır. Bu durum, jantın gerçek merkezine göre kayma oluşturmakta, işleme sonrası merkez kaçıklık ve balans değerlerini olumsuz etkilemektedir.

Bunun yanında, farklı jant ebatlarının işlenebilmesi için basma takozlarının ve merkezleme elemanlarının operatör tarafından sökölüp yeniden takılması gerekmektedir. Ortalama 13 dakika süren bu ayar işlemleri hem üretim verimliliğini düşürmekte hem de operatör hatalarına bağlı istenmeyen ıskartalara yol açmaktadır., Mevcut sistemde aparat kaynaklı yaklaşık %0,41 oranında ıskarta üretim gerçekleştiği belirlenmiştir.



Şekil 1 . Mevcut durumda hareketli merkezleme sistemi ile çalışan ayna modeli



Şekil 2. Mevcut ayna merkezleme sistemi

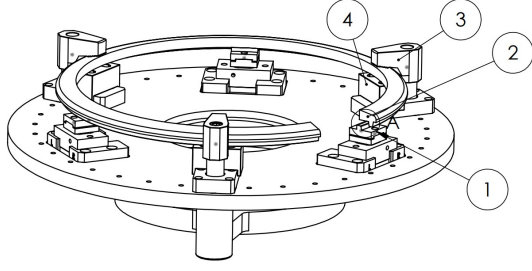
3. TASARLANAN YENİ AYNA MODELİ

Yeni tasarımda, hareketli merkezleme mekanizması tamamen ortadan kaldırılmış ve sabit merkezlemeli bir yapı geliştirilmiştir.

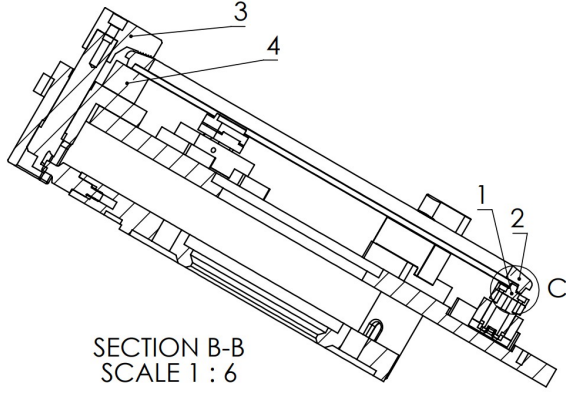
Jant referans çemberinin 10° açılı iç yüzeyi dikkate alınarak fikstürde aynı açıya sahip kanallı bir yapı oluşturulmuştur. Jant, bu kanala oturduğunda açılı yüzeyler birbirine tam olarak temas etmekte ve parça kendiliğinden merkezlenmektedir. Böylece hem talaş sıkışması hem de hareketli parçaların eş çalışmama sorunu ortadan kaldırılmıştır.

Ayrıca yeni tasarımda, aynı fikstür üzerinde üç farklı ebat jant bağlanabilecek şekilde kademeli bir yapı uygulanmıştır. Bu yaklaşım, sök-tak işlemini tamamen ortadan kaldırarak operatör bağımlılığını azaltmış ve ayar süresini 8 dakikaya düşürmüştür.

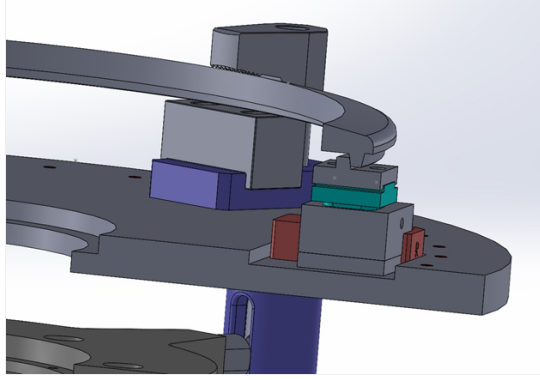
Bunun yanında, basma takozlarının yüzey alanı genişletilmiş ve böylece döküm kaynaklı çarpılmaların işleme öncesinde daha kolay tespit edilmesi sağlanmıştır.



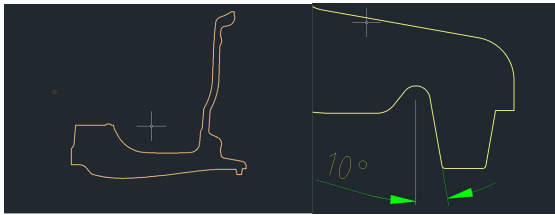
Şekil 3. Tasarım fikstür parçaları ve referans çemberi bağlanma biçimi



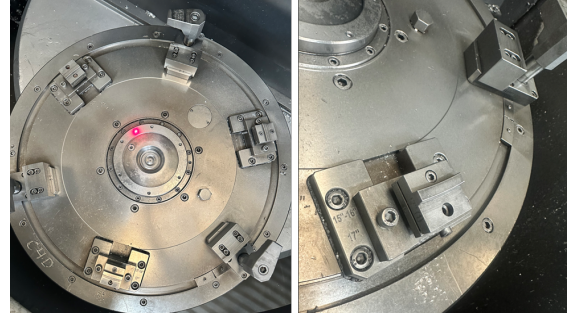
Şekil 4. İşlenen parçanın oturma biçimi



Şekil 5. Jant referans çemberinin fikstür merkezlemesine konumlandırılması



Şekil 6. Mevcut jant referans çemberi ve referans çemberi açısı



Şekil 7. Tasarım sonrası uygulanması

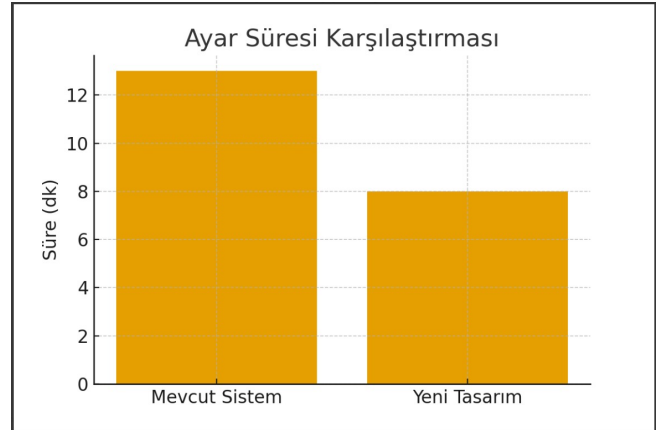
4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Yapılan tasarım sonucu hareketli merkezleme yapısı ortadan kaldırılarak aşınmaların ve zamanla alüminyum talaşı ve bor yağı kaynaklı oluşabilen arızaların önüne geçilmiştir. Mevcutta ortalama 13 dk olan ayar süresi 8 dk olarak iyileştirilmiştir. Ayrıca balanstan kaynaklı oluşan ıskarta jantların oranı %0,41 seviyelerinden %0,33 seviyelerine kadar gerileyerek kalitesizlik maliyetlerinde azalma sağlanmıştır.

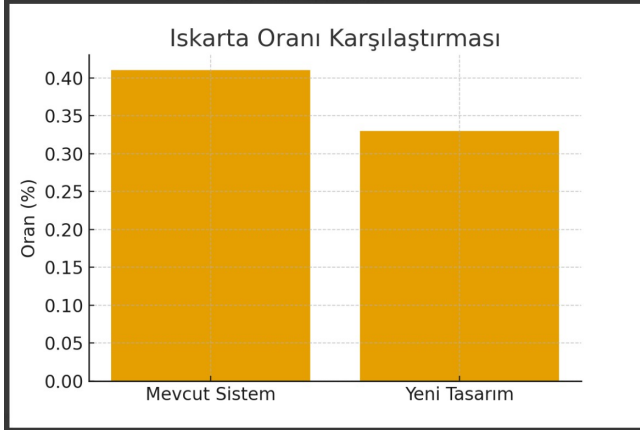
Bu çalışmada, jant işleme operasyonlarında kullanılan fikstürler için yeni bir sabit merkezlemeli ayna modeli geliştirilmiştir. Tasarım sayesinde hareketli parçalardan kaynaklanan aşınma ve talaş sıkışması problemleri ortadan kaldırılmış, salgı/yalpa ve yüzey pürüzlülüğü değerlerinde iyileşme sağlanmış, ayar süresi kısaltılmış ve hurda oranı düşürülmüştür. Ayrıca, aynı fikstür üzerinde üç farklı ebat jantın işlenebilmesi mümkün kılınarak operatör müdahalesi en aza indirilmiştir.

Teknik veriler ve ekonomik analizler birlikte değerlendirildiğinde, yeni tasarımın otomotiv endüstrisinde üretim verimliliğini artıran, maliyetleri düşüren ve kaliteyi yükselten yenilikçi bir çözüm sunduğu sonucuna varılmıştır.

5. TABLOLAR VE ŞEKİLLER



Şekil 7. Ayar süresi 2024-2025 paretosu



Şekil 8. Balans ıskartası 2024-2025 paretosu

6. REFERANSLAR

- [1] A. Nee, S.K. Ong, G. Senthil Kumar, “Advanced fixture design for precision manufacturing,” *Springer*, 2004.
- [2] C. K. Toh, “A study of the effects of cutter path strategies and orientations in milling,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 152, pp. 346–356, 2004.
- [3] P. S. Gao, et al., “Error analysis and precision improvement of fixture locating and clamping,” *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 45, pp. 211–220, 2005
- [4] R. M. Sundaram, “Setup reduction in machining: a case study,” *International Journal of Production Research*, vol. 35, no. 9, pp. 2569–2582, 1997.

ÇEVRESEL VE KURUMSAL SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK AÇISINDAN OTOMOTİV SEKTÖRÜNDE KARŞILAŞTIRMALI UYGULAMALAR

Demeter Zeynep IRMAK KESKİN¹, Berrak EROL NALBUR²

Bursa Uludağ Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Bursa / TÜRKİYE

E-Posta: 032050009@ogr.uludag.edu.tr

E- Posta: bnalbur@uludag.edu.tr

ÖZET

Küresel çevresel sorunlar, toplumsal beklentiler ve yönetim standartları, otomotiv sektörünü sürdürülebilirliği iş modellerinin merkezine taşımaya zorlamaktadır. Bu çalışma, Türkiye (Tofaş, Karsan), Almanya (Volkswagen, BMW), Japonya (Toyota) ve Çin'den (BYD) seçilen altı otomotiv firmasının 2023–2024 yıllarına ait sürdürülebilirlik raporlarını inceleyerek çevresel, sosyal, yönetim ve şeffaflık boyutlarında karşılaştırmalı bir değerlendirme yapmaktadır. Araştırmanın amacı, firmaların stratejik yaklaşımlarındaki benzerlikleri ve farklılıkları ortaya koyarak sektör genelinde benimsenen sürdürülebilirlik eğilimlerini bütüncül bir bakışla sunmaktır.

Analizler, tüm firmaların karbon emisyonlarının azaltılması, enerji ve kaynak verimliliği, atık yönetimi ve döngüsel ekonomiye geçiş konularında stratejiler geliştirdiğini göstermektedir. Örneğin, Tofaş 2023 yılında enerji verimliliği projeleri sayesinde 17.000 ton CO₂ emisyon azaltımı sağlamış ve üretim atıklarının tamamını geri kazanım yoluyla yönetmiştir. Karsan, atık su arıtımından çıkan 17 ton endüstriyel çamuru geri kazanıma yönlendirmiş, ayrıca su üretim tesislerinde kimyasal kullanımını %85 azaltmıştır. Volkswagen, 2050 yılına kadar net sıfır karbon hedefi ve 2030'a kadar binek araçlarda karbon ayak izini %30 azaltma planı ile öne çıkarken; ürünlerinde %40 geri dönüştürülmüş malzeme kullanımını hedeflemektedir. Toyota, üretim süreçlerinde ortaya çıkan atıkların %93'ünü geri dönüştürmüş, tek kullanımlık ambalaj malzemelerinde 2018'e kıyasla %22 azaltım sağlamıştır. BMW ise üretim süreçlerinde yenilenebilir enerji payını artırarak döngüsel ekonomiye geçişi hızlandırmaktadır.

Sonuç olarak, Avrupa merkezli firmalar (VW, BMW) uzun vadeli, ölçülebilir ve bağımsız denetimli raporlama uygulamalarıyla güçlü bir konumdayken; Türkiye merkezli firmalar (Tofaş, Karsan) operasyonel düzeyde somut çıktılar üretmekte; Asya merkezli firmalar (Toyota, BYD) ise kurum kültürü ve paydaş katılımını önceleyen kapsamlı

stratejiler geliştirmektedir. Genel eğilim, tüm firmaların sürdürülebilirliği rekabet gücü, yatırımcı güveni ve toplumsal meşruiyet için vazgeçilmez bir stratejik alan olarak gördüğünü ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Otomotiv sektörü, sürdürülebilirlik, döngüsel ekonomi, emisyon azaltımı, çevresel, sosyal ve yönetim ÇSY.

ABSTRACT

Global environmental challenges, societal expectations, and governance standards are pushing the automotive industry to place sustainability at the core of its business models. This study examines the sustainability reports of six automotive companies from Turkey (Tofaş, Karsan), Germany (Volkswagen, BMW), Japan (Toyota), and China (BYD) for the years 2023–2024, providing a comparative evaluation across environmental, social, governance, and transparency dimensions. The aim is to identify strategic similarities and differences among firms and present a holistic perspective on sustainability trends adopted across the sector.

The analysis shows that all firms have developed strategies focusing on carbon emission reduction, energy and resource efficiency, waste management, and the transition to a circular economy. For example, in 2023 Tofaş achieved a 17,000-ton CO₂ reduction through energy efficiency projects and managed all production-related waste through recovery. Karsan directed 17 tons of industrial sludge from wastewater treatment to recovery processes and reduced chemical use in water production facilities by 85%. Volkswagen stands out with its target of achieving net zero carbon by 2050, reducing the carbon footprint of passenger cars by 30% by 2030, and reaching 40% recycled material use in its products. Toyota recycled 93% of production-related waste and reduced single-use packaging materials by 22% compared to 2018. BMW, on the other hand, has

accelerated the transition to a circular economy by increasing the share of renewable energy in its production processes.

In conclusion, European companies (VW, BMW) demonstrate strength through long-term, measurable, and independently audited reporting practices; Turkish companies (Tofaş, Karsan) focus on operational-level, tangible outcomes; while Asian companies (Toyota, BYD) emphasize strategies embedded in corporate culture and stakeholder engagement. Overall, the findings indicate that all firms increasingly regard sustainability as an indispensable strategic domain for maintaining competitiveness, ensuring investor confidence, and securing social legitimacy.

Keywords: Automotive industry, sustainability, circular economy, emission reduction, resource efficiency, Environmental Social and Governance (ESG)

1. GİRİŞ

Küresel çevresel sorunlar, toplumsal beklentiler ve yönetim standartları, otomotiv sektörünü sürdürülebilirliği iş modellerinin merkezine taşımaya zorlamaktadır. Bu çalışma, Türkiye (Tofaş, Karsan), Almanya (Volkswagen, BMW), Japonya (Toyota) ve Çin'den (BYD) seçilen altı otomotiv firmasının 2023–2024 yıllarına ait sürdürülebilirlik raporlarını inceleyerek çevresel, sosyal, yönetim ve şeffaflık boyutlarında karşılaştırmalı bir değerlendirme yapmaktadır. Araştırmanın amacı, firmaların stratejik yaklaşımlarındaki benzerlikleri ve farklılıkları ortaya koyarak sektör genelinde benimsenen sürdürülebilirlik eğilimlerini bütüncül bir bakışla sunmaktır.

Analizler, tüm firmaların karbon emisyonlarının azaltılması, enerji ve kaynak verimliliği, atık yönetimi ve döngüsel ekonomiye geçiş konularında stratejiler geliştirdiğini göstermektedir. Örneğin, Tofaş 2023 yılında enerji verimliliği projeleri sayesinde 17.000 ton CO₂ emisyon azaltımı sağlamış ve üretim atıklarının tamamını geri kazanım yoluyla yönetmiştir. Karsan, atık su arıtımından çıkan 17 ton endüstriyel çamuru geri kazanıma yönlendirmiş, ayrıca su üretim tesislerinde kimyasal kullanımını %85 azaltmıştır. Volkswagen, 2050 yılına kadar net sıfır karbon hedefi ve 2030'a kadar binek araçlarda karbon ayak izini %30 azaltma planı ile öne çıkarken; ürünlerinde %40 geri dönüştürülmüş malzeme kullanımını hedeflemektedir. Toyota, üretim süreçlerinde ortaya çıkan atıkların %93'ünü geri dönüştürmüş, tek kullanımlık ambalaj malzemelerinde 2018'e kıyasla %22 azaltım sağlamıştır. BMW ise üretim süreçlerinde yenilenebilir enerji payını artırarak döngüsel ekonomiye geçişi hızlandırmaktadır.

Sonuç olarak, Avrupa merkezli firmalar (VW, BMW) uzun vadeli, ölçülebilir ve bağımsız denetimli raporlama uygulamalarıyla güçlü bir konumdayken; Türkiye merkezli firmalar (Tofaş, Karsan) operasyonel düzeyde somut çıktılar üretmekte; Asya merkezli firmalar (Toyota, BYD)

ise kurum kültürü ve paydaş katılımını önceleyen kapsamlı stratejiler geliştirmektedir. Genel eğilim, tüm firmaların sürdürülebilirliği rekabet gücü, yatırımcı güveni ve toplumsal meşruiyet için vazgeçilmez bir stratejik alan olarak gördüğünü ortaya koymaktadır.

Bu çalışmanın temel amacı, küresel otomotiv sektöründe çevresel ve kurumsal sürdürülebilirlik uygulamalarının farklı coğrafyalardaki yansımalarını ortaya koymaktır. Bu kapsamda Türkiye'den Tofaş ve Karsan, Almanya'dan BMW ve Volkswagen, Japonya'dan Toyota ve Çin'den BYD olmak üzere altı firma seçilmiş; bu firmaların 2023–2024 yıllarına ait sürdürülebilirlik raporları incelenmiştir. Analizler, çevresel (emisyon azaltımı, enerji ve kaynak verimliliği, atık yönetimi, döngüsel ekonomi), sosyal (çalışan hakları, toplumsal katkı, çeşitlilik), kurumsal yönetim (etik kurallar, denetim mekanizmaları, yönetim yapıları) ve şeffaflık (raporlama standartları, bağımsız doğrulama, veri paylaşımı) boyutlarında yapılmıştır. Böylece, farklı ülke ve firmalar arasında benimsenen stratejik yaklaşımların benzerlikleri ve farklılıkları değerlendirilerek, sektörde öne çıkan eğilimler bütüncül bir bakış açısıyla ortaya konulmuştur.

2. YÖNTEM

Bu çalışmada araştırma yöntemi olarak nitel doküman analizi kullanılmıştır. Doküman analizi, belirli bir konuya ilişkin yazılı materyallerin sistematik biçimde incelenmesi yoluyla bilgi elde etmeyi amaçlayan bir yöntemdir ve özellikle kurumsal sürdürülebilirlik raporlarının içeriklerinin karşılaştırılması için uygun görülmektedir [8]. Araştırmada incelenen veri seti, altı otomotiv şirketinin kamuya açık olarak yayımladığı raporlardan oluşmaktadır:

- Tofaş Türk Otomobil Fabrikası A.Ş. 2024 Faaliyet Raporu [5]
- Karsan Otomotiv Sanayi ve Ticaret A.Ş. 2024 Entegre Faaliyet Raporu [6]
- BMW Group Report 2024 [7]
- Volkswagen AG Annual Report 2024 [9]
- Toyota Motor Corporation Sustainability Data Book 2024 [10]
- BYD Co. Ltd. CSR Report 2023 [11]

Söz konusu raporlar, şirketlerin çevresel, sosyal, yönetim ve şeffaflık boyutlarındaki sürdürülebilirlik faaliyetlerini kapsamaktadır. Çalışmada, literatürde yaygın olarak kullanılan ÇYS çerçevesi, bu araştırmada “Şeffaflık” boyutu eklenerek genişletilmiştir.

Dokümanlar dört temel boyut çerçevesinde incelenmiştir:

1. Şeffaflık: Raporlama standartları, bağımsız güvence mekanizmaları, raporların erişilebilirliği ve veri açıklığı,
2. Çevresel: Emisyon azaltımı, enerji kullanımı, yenilenebilir enerji oranı, su ve atık yönetimi, döngüsel ekonomi uygulamaları,
3. Sosyal: Çalışan çeşitliliği, iş sağlığı ve güvenliği, eğitim ve gelişim faaliyetleri, toplumsal katkılar,
4. Yönetişim: Yönetim kurulu yapısı, etik ilkeler, yolsuzlukla mücadele politikaları, risk yönetimi.

Bu boyutların seçilmesinde uluslararası literatürde sıkça başvurulanan GRI, TCFD, SASB ve ESRS standartları temel alınmış; ayrıca akademik çalışmalarda önerilen tematik sınıflandırmalar dikkate alınmıştır. Örneğin, Mumcu ve Bakoğlu (2022), otomotiv sektöründe sürdürülebilirlik uygulamalarını çevresel, ekonomik ve sosyal başlıklar altında incelemiştir [4]. Bu çalışmada ise söz konusu yaklaşım, yönetim ve şeffaflık boyutları eklenerek genişletilmiştir.

Araştırma sürecinde her şirketin raporları ayrıntılı olarak incelenmiş, ilgili bölümlerden nicel ve nitel veriler çıkarılmış, bu veriler tablolar halinde düzenlenmiş ve şirketler arası karşılaştırmalar yapılmıştır. Bulgular, her boyut için ayrı başlıklar altında sunulmuş; elde edilen sonuçlar ulusal ve uluslararası akademik literatür ile karşılaştırılmıştır.

Araştırmanın en önemli sınırlılığı, yalnızca kamuya açık raporlara dayanmasıdır. Şirketlerin iç denetim raporları, yayımlanmamış stratejik belgeleri veya üçüncü taraf bağımsız veri setleri analiz kapsamı dışında bırakılmıştır. Bununla birlikte, kullanılan belgelerin şirketlerin resmi raporları olması elde edilen verilerin güvenilirliğini artırmaktadır.

3. BULGULAR VE TARTIŞMALAR

3.1 ŞEFFAFLIK

Şeffaflık, kurumsal sürdürülebilirlik raporlamasında en önemli göstergelerden biri olarak kabul edilmektedir. Şirketlerin yalnızca performans verilerini sunmaları yeterli değildir; bu verilerin uluslararası standartlara uygun, karşılaştırılabilir ve bağımsız güvence süreçlerinden geçmiş olması beklenmektedir. Avrupa Birliği'nin son yıllarda yürürlüğe koyduğu Kurumsal Sürdürülebilirlik Raporlama Direktifi (CSRD), bu sebeple küresel bir referans noktası oluşturmuştur. Dolayısıyla otomotiv sektöründe faaliyet gösteren firmaların şeffaflık düzeyi, yalnızca kendi kurumsal sorumluluklarının değil, aynı zamanda piyasa erişimlerinin de bir gerekliliği olarak öne çıkmaktadır [6].

Avrupa merkezli şirketler olan BMW ve Volkswagen, AB düzenlemeleri sayesinde şeffaf raporlama uygulamalarında öncüdür. BMW Group 2024 Raporu'nda, ESRS standartlarının gereklerini yerine getirdiğini ve sürdürülebilirlik hedeflerini SASB göstergeleriyle desteklediğini belirtmiştir [7]. Raporda ayrıca, iklim değişikliğine ilişkin hedeflerin PwC tarafından bağımsız güvenceye tabi tutulduğu açıkça ifade edilmiştir. Bu durum, BMW'nin raporlama süreçlerinde şeffaflığı kurumsal yönetim mekanizmalarıyla bütünleştirdiğini göstermektedir. Volkswagen de 2024 Yıllık Raporu'nda AB Taksonomisi gerekliliklerini içeren ayrıntılı tablolar sunmuş ve sürdürülebilirlik verilerini bağımsız denetime açmıştır [9].

Toyota, Japonya merkezli bir şirket olarak gönüllü standartlara yönelmiştir. 2024 Sürdürülebilirlik Veri Kitabı'nda TCFD, SASB ve GRI göstergelerinin birlikte kullanıldığı görülmektedir [10]. Bu yaklaşım, şirketin küresel ölçekte faaliyet gösterdiği farklı pazarlarda çeşitli

paydaşların beklentilerini karşılamaya dönük stratejisinin bir yansımasıdır. Toyota ayrıca raporlarında üçüncü taraf doğrulama süreçlerine yer vermiş, böylece yatırımcı güvenini pekiştirmiştir.

BYD, Çin merkezli bir üretici olarak HKEX ESG (ÇYS) Guide, GRI ve BM Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları çerçevelerine atıfta bulunmuş, ancak bağımsız güvence süreçleri sınırlı kalmıştır [11]. Bu durum, Asya merkezli firmaların şeffaflık konusundaki uygulamalarında Avrupa ve Japonya'ya kıyasla daha geride olduklarını ortaya koymaktadır.

Türkiye merkezli otomotiv şirketleri Tofaş ve Karsan, şeffaf raporlama konusunda son yıllarda ilerleme kaydetmişlerdir. Tofaş'ın 2024 Faaliyet Raporu'nda çevresel ve sosyal göstergeler ayrıntılı biçimde sunulmuş, ancak bu verilerin ÇYS güvencesi (Çevresel, Sosyal, Yönetişim raporlaması için bağımsız güvence) kapsamında bağımsız denetime tabi tutulmadığı görülmüştür [5]. Karsan ise 2024 Entegre Raporu'nda GRI uyumunu sağlamış ve seçili göstergeler için makul güvence almıştır [6]. Bu durum, Türkiye'de bağımsız güvence süreçlerinin gelişmekte olduğunu ancak hâlen sınırlı düzeyde uygulandığını göstermektedir.

Literatürde de Türkiye'deki raporlamaların daha çok mevzuata uyum amaçlı olduğu, gönüllü şeffaf raporlama kültürünün henüz yeterince gelişmediği ifade edilmektedir. Demir (2024), otomotiv sektöründe ekonomik ve ekolojik sürdürülebilirlik uygulamalarının dengeli biçimde ilerlemesi gerektiğini vurgulamış ve bu dengenin sağlanabilmesi için raporlama süreçlerinin şeffaf olması gerektiğine dikkat çekmiştir [5].

Çalışmada incelenen altı şirketin şeffaflık düzeyleri Tablo 1'de özetlenmiştir.

Tablo 1. Raporlama Standartları ve Bağımsız Güvence Durumu

Şirket	Standart/Çerçeve	Bağımsız Güvence
BMW	ESRS + SASB, SBTi uyumlu	PwC tarafından denetim [7]
Volkswagen	AB Taksonomisi, ESRS	Bağımsız denetim raporu [9]
Toyota	TCFD + SASB + GRI	Üçüncü taraf doğrulama [10]
Tofaş	ÇYS başlıkları (faaliyet raporu)	Finansal assurance, ÇYS yok [5]
Karsan	GRI uyumlu entegre rapor	Seçili göstergeler için güvence [6]
BYD	HKEX ESG (ÇYS) Guide + GRI + SDG	Sınırlı assurance, kapsam dar [11]

Tablodaki veriler, Avrupa merkezli şirketlerin (BMW, Volkswagen) şeffaflık konusunda daha ileri bir aşamada olduğunu göstermektedir. Bu şirketler yalnızca ulusal değil, aynı zamanda uluslararası standartlara uyum sağlamış, bağımsız denetim süreçlerini de eksiksiz olarak uygulamışlardır. Toyota ise çoklu standart kullanımıyla

küresel ölçekte farklı paydaş gruplarına karşı hesap verebilirlik geliştirmiştir. Türkiye merkezli Tofaş ve Karsan ise şeffaflık açısından ilerleme kaydetmekle birlikte, bağımsız güvence süreçlerinde Avrupa'daki uygulamaların gerisinde kalmaktadır. BYD'nin raporlaması ise çerçeve açısından zengin olmasına karşın, bağımsız doğrulama eksikliği nedeniyle sınırlı bir şeffaflık sunmaktadır. Mumcu ve Bakoğlu (2022), BMW, Toyota ve Ford'un sürdürülebilirlik raporlarını karşılaştırdıkları çalışmada toplam 1248 uygulama tespit etmiş ve bu uygulamaların özellikle çevresel ve sosyal alanlarda yoğunlaştığını belirtmişlerdir. Ayrıca çalışmada şirketler arasında benzerleşme (eşbenzeşme) eğilimi gözlemlenmiştir [4]. Bu bulgu, otomotiv sektöründe sürdürülebilirlik raporlamasının giderek ortak bir yapıya büründüğünü göstermektedir. Kamińska-Witkowska (2024) tarafından yapılan uluslararası bir analizde de benzer sonuçlara ulaşılmış, seçili otomotiv şirketlerinin raporlamalarının büyük oranda ESRS, TCFD ve GRI standartları etrafında yoğunlaştığı ifade edilmiştir [6]. Bu sonuç, şeffaflık düzeyinde küresel bir standardizasyon eğilimi olduğunu göstermektedir. Türkiye'de faaliyet gösteren otomotiv şirketlerinin AB pazarına ihracat yapabilmeleri için şeffaflık kriterlerini geliştirmeleri büyük önem taşımaktadır. SKDM gibi düzenlemeler yalnızca emisyon azaltımını değil, aynı zamanda bu verilerin uluslararası standartlara uygun olarak raporlanmasını da zorunlu kılmaktadır. Dolayısıyla Tofaş ve Karsan'ın önümüzdeki dönemde bağımsız güvence kapsamını genişletmeleri ve raporlama standartlarını çeşitlendirmeleri gerekmektedir. Bu durum yalnızca çevresel uyum açısından değil, aynı zamanda rekabet gücü bakımından da stratejik bir gereklilik olarak değerlendirilmektedir.

3.2. ÇEVRESEL BOYUT

Çevresel boyut, otomotiv sektöründe sürdürülebilirlik tartışmalarının merkezinde yer almaktadır. Ulaştırma kaynaklı sera gazı emisyonları küresel ölçekte artmaya devam ederken, otomotiv firmalarının enerji tüketimi, emisyon azaltımı, su ve atık yönetimi gibi konularda ortaya koydukları performans, sektörün geleceği açısından belirleyici hale gelmiştir. Uluslararası Enerji Ajansı verilerine göre, karayolu taşımacılığı toplam küresel CO₂ emisyonlarının yaklaşık %17'sini oluşturmaktadır [1]. Bu nedenle otomotiv firmalarının çevresel göstergelerde sergiledikleri performans, yalnızca şirketlerin karbon ayak izini azaltmaları açısından değil, aynı zamanda ülkelerin iklim hedeflerine katkı sağlamaları bakımından da stratejik bir rol üstlenmektedir. BMW, 2024 raporunda sera gazı emisyonlarını 2030'a kadar Kapsam 1 ve Kapsam 2'de %80, Kapsam 3'te ise %40 azaltmayı hedeflediğini açıklamıştır [7]. Ayrıca üretilen her araç başına CO₂ emisyonunu 2019 seviyelerine göre %50 oranında düşürmeyi planlamaktadır. BMW aynı zamanda 2030 yılına kadar toplam satışlarının %50'sinin bataryalı elektrikli araçlardan (BEV) oluşacağını

öngörmektedir. Bu hedefler, şirketin iklim nötrlüğü yolunda ileri düzeyde stratejik bir yaklaşım benimsediğini göstermektedir.

Volkswagen, 2050 yılına kadar net karbon nötr olma hedefi, 2030 yılına kadar binek araçlardaki karbon ayak izini %30 azaltma planı ve ürünlerinde %40 geri dönüştürülmüş malzeme kullanımı hedefi, şirketin çevresel vizyonunun temelini oluşturmaktadır. Bu stratejiler, 'regenerate+' başlığı altında bütünleştirilmiştir [9]. Regenerate+ programı, Volkswagen'in döngüsel ekonomi vizyonunu kurumsallaştırmaktadır. Bu program; özellikle batarya geri dönüşümü, araç ömrü sonunda malzeme kazanımı, yenilenebilir enerji kullanımının yaygınlaştırılması ve biyoçeşitlilik projeleri gibi başlıklara odaklanmaktadır. Şirket, Regenerate+ sayesinde yalnızca üretim sürecinde değil, ürün yaşam döngüsünün tüm aşamalarında çevresel etkileri azaltmayı hedeflemektedir. Ayrıca üretim tesislerinde kullanılan elektriğin %100 yenilenebilir kaynaklardan elde edilmesi için yatırımlarını artırmaktadır. 2024 raporunda, su tüketiminin ve atık üretiminin azaltılması yönünde ayrıntılı göstergeler sunulmuştur.

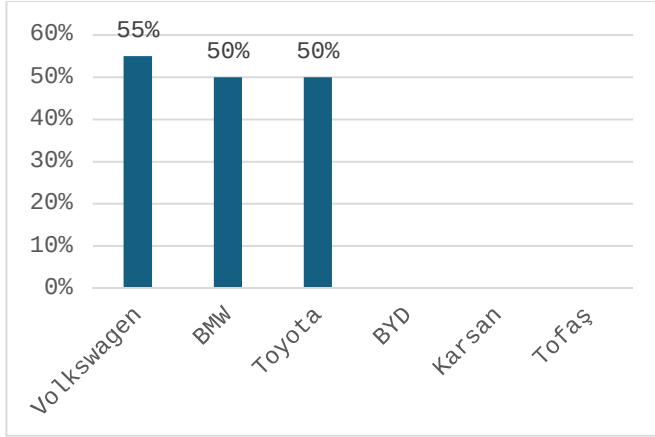
Toyota, 2050 Çevresel Hedefleri kapsamında karbon nötr üretim süreçleri geliştirmeyi amaçlamakta, aynı zamanda "Su Pozitif Şirket" olma vizyonu ile üretim tesislerinde su kullanımını azaltmayı hedeflemektedir [10]. Raporda, 2030 yılına kadar yeni araç satışlarının %50'sinden fazlasının elektrikli modellerden oluşması planlanmaktadır. Toyota ayrıca atık yönetimi konusunda döngüsel ekonomi yaklaşımını benimsemekte ve geri dönüşüm oranlarını artırmaya dönük stratejiler geliştirmektedir. Toyota ayrıca, 2018 yılına kıyasla tek kullanımlık ambalaj malzemelerinde %22 oranında azaltım gerçekleştirmiştir.

BYD, elektrikli araç üretiminde küresel liderlerden biri haline gelmiştir. 2023 raporunda, yalnızca Çin'de değil küresel ölçekte de karbon nötr üretim tesisleri kurmayı hedeflediğini açıklamış, yenilenebilir enerji kullanımını artırmaya yönelik veriler sunmuştur [11]. BYD'nin 2023 Kurumsal Sosyal Sorumluluk Raporu ayrıca, enerji ve su yönetimi uygulamalarını, atık azaltımını ve bu süreçlerde paydaş katılımını güçlendirmeye yönelik adımlar içerdiğini ortaya koymaktadır. Bununla birlikte BYD raporlarında çevresel verilerin bağımsız güvence kapsamında olmaması, açıklanan bilgilerin güvenilirliğini sınırlamaktadır.

Türkiye merkezli firmalardan Tofaş, 2024 Faaliyet Raporu'nda enerji verimliliği ve emisyon azaltımı konularında somut veriler sunmuştur. Raporda üretim tesislerinde kullanılan elektriğin %37'sinin yenilenebilir kaynaklardan sağlandığı, atıkların %96'sının geri kazanıldığı belirtilmiştir [5]. Buna ek olarak Tofaş, 2023 yılında enerji verimliliğine yönelik projeler sayesinde yaklaşık 17.000 ton CO₂ emisyon azaltımı sağlamıştır. Ancak Tofaş'ın karbon nötrlüğü ilişkin net bir yol haritası sunmadığı, bu yönüyle Avrupa merkezli firmaların gerisinde kaldığı görülmektedir.

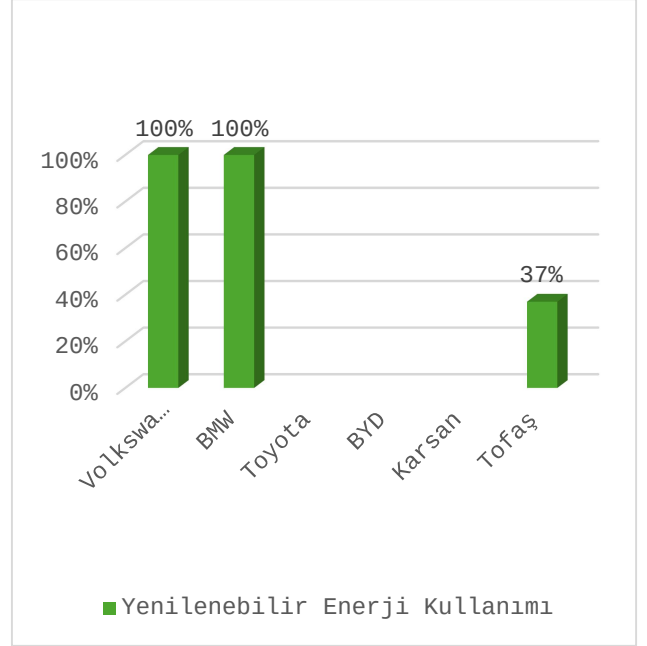
Karsan, 2024 Entegre Raporu'nda karbon nötrlük hedeflerini daha somut biçimde ortaya koymuştur. Şirket,

elektrikli ve otonom otobüs üretiminde ilerleme kaydettiğini ve 2030 yılına kadar karbon emisyonlarını %50 azaltmayı planladığını açıklamıştır [6]. Karsan ayrıca su tüketimini azaltmaya dönük uygulamalar geliştirmiş, üretimde dögüsel ekonomi yaklaşımını ön plana çıkarmıştır. Ayrıca Karsan, atık su arıtımında oluşan 17 ton endüstriyel çamuru tamamen geri kazanım süreçlerine yönlendirmiş ve su üretim tesislerinde kimyasal kullanımını %85 oranında azaltmıştır. Aşağıdaki tabloda incelenen şirketlerin çevresel hedefleri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.



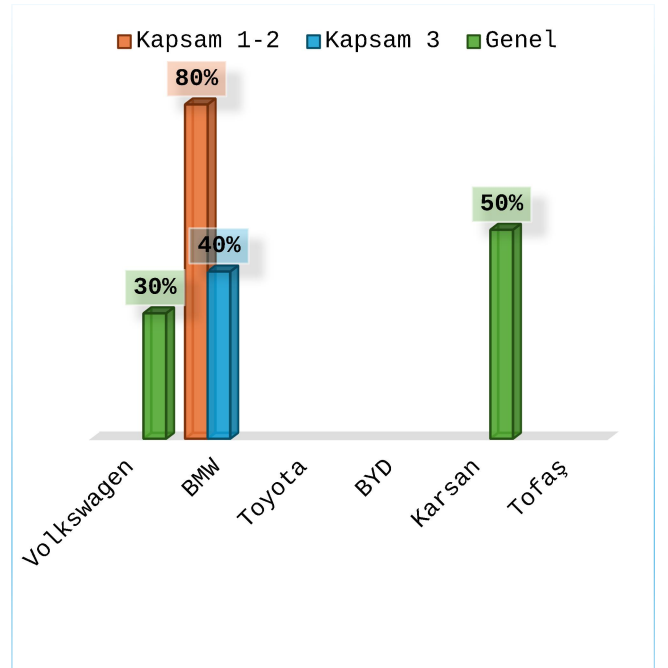
Şekil 1. BEV (Bataryalı Elektrikli Araç) Satış Hedefleri Grafiği

Şekil 1’deki Grafik, 2030 yılına yönelik BEV hedeflerinde Volkswagen (%55), BMW (%50) ve Toyota (%50) net hedefler koyarken; BYD yüzdesel bir oran açıklamamakla birlikte küresel liderliği hedeflediğini belirtmiştir. Karsan ise 2024’te toplam cirosunun %54’ünü elektrikli araçlardan elde etmiş ve 540 adet elektrikli araç teslim etmiştir. Tofaş ise henüz resmi bir BEV hedefi açıklamamıştır.



Şekil 2. Yenilenebilir Enerji Kullanımı

Şekil 2’deki grafikte yenilenebilir enerji kullanımında BMW ve Volkswagen %100 oran ile açık farkla öne çıkarken, Tofaş %37 seviyesinde kalmıştır. Toyota, BYD ve Karsan yatırımlarını artırmalarına rağmen kesin yüzdesel veriler sunmamış, bu da şeffaflık ve karşılaştırılabilirlik açısından bir eksiklik yaratmaktadır.



Şekil 3. Emisyon Azaltım Hedefleri (2030)

Grafik, emisyon azaltım hedeflerinde özellikle BMW’nin (%80 Kapsam 1-2, %40 Kapsam 3) ve Karsan’ın (%50) iddialı stratejiler ortaya koyduğunu göstermektedir.

Volkswagen ise 2030 için %30 azaltım ve 2050’de net sıfır hedefiyle konumlanmaktadır. Toyota, BYD ve Tofaş uzun vadeli karbon nötrlük vizyonu açıklamakla birlikte kesin yüzdesel azaltım oranları paylaşmamıştır; bu durum karşılaştırılabilirliği sınırlamaktadır.

Tablo 2. Çevresel Göstergeler ve Hedefler

Şirket	Emisyon Hedefi	Yenilenebilir Enerji	Atık Yönetimi	Su Kullanımı Stratejisi
BMW	2030’a kadar Kapsam 1-2 %80, Kapsam 3 %40 azaltım	%100 yenilenebilir	Döngüsel ekonomi vurgusu	Su verimliliği yatırımları
VW	2050 net sıfır, 2030 Avrupa satış %55 BEV	%100 yenilenebilir	Atık azaltımı ve geri dönüşüm	Su tüketimi düşürülme
Toyota	2050 karbon nötr üretim, satışların %50’si EV	Artış planlanmakta	Geri dönüşüm oranı artırılmakta	“Su Pozitif Şirket” hedefi
BYD	Karbon nötr tesisler, küresel EV liderliği	Yüksek kullanım	Sınırlı bilgi	Sınırlı bilgi
Tofaş	Net yol haritası yok, enerji verimliliği %37 RE	%37 yenilenebilir	Atıkların %100’ü geri kazanım	Net bilgi yok
Karsan	2030’a kadar emisyonlarda %50	Yatırımlar artmakta	Döngüsel ekonomi uygulamaları	Su tüketimi azaltılmakta

	azaltım			
--	---------	--	--	--

Tablodan görüldüğü üzere Avrupa merkezli firmalar (BMW, Volkswagen) daha net ve iddialı hedefler koyarken, Türkiye merkezli firmalar hâlen bu konuda gelişim aşamasındadır. Toyota ve BYD gibi Asya merkezli firmalar ise elektrikli araç stratejileriyle öne çıkmaktadır.

Mumcu ve Bakoğlu (2022), üç otomotiv şirketinin raporlarını analiz ettikleri çalışmada çevresel uygulamaların toplam faaliyetler içinde en yüksek paya sahip olduğunu ortaya koymuştur [4]. Bu bulgu, çevresel sürdürülebilirliğin sektörde temel önceliklerden biri olduğunu göstermektedir. Demir (2024) ise Türkiye’de ekonomik sürdürülebilirlik ile ekolojik sürdürülebilirliğin uyumlu biçimde ilerlemesi gerektiğini belirtmiş, özellikle karbon azaltım stratejilerinin şeffaf raporlama ile desteklenmesi gerektiğini vurgulamıştır [5]. Kamińska-Witkowska (2024), uluslararası firmaların raporlarında çevresel göstergelerin giderek daha ayrıntılı hale geldiğini, ESRS ve TCFD uyumunun bu süreçte belirleyici olduğunu tespit etmiştir [6].

Türkiye otomotiv sektörünün AB pazarına entegrasyonu, çevresel göstergelerin uluslararası standartlara uyumlu biçimde raporlanmasını zorunlu hale getirmektedir. SKDM uygulaması, yalnızca emisyonların azaltılmasını değil, aynı zamanda bu emisyon verilerinin şeffaf ve doğrulanabilir şekilde sunulmasını şart koşmaktadır. Bundan dolayı Tofaş ve Karsan’ın çevresel performanslarını geliştirmeleri ve özellikle yenilenebilir enerji yatırımlarını artırmaları kritik bir gereklilik olarak ortaya çıkmaktadır. Ayrıca döngüsel ekonomi ve su yönetimi konularında daha kapsamlı stratejiler geliştirilmesi, sektörün uzun vadeli rekabet gücünü destekleyecektir.

3.3. SOSYAL BOYUT

Sosyal boyut, sürdürülebilirlik çerçevesinde şirketlerin çalışanlarına, tedarikçilerine, müşterilerine ve içinde bulundukları topluma karşı sorumluluklarını ifade etmektedir. Çalışma koşullarının iyileştirilmesi, çalışan çeşitliliğinin sağlanması, iş sağlığı ve güvenliği uygulamalarının güçlendirilmesi ve toplumsal katkı projelerinin geliştirilmesi bu boyutun temel unsurlarını oluşturmaktadır. Uluslararası Çalışma Örgütü (ILO), işletmelerin sosyal sürdürülebilirlik bağlamında özellikle “insana yakışır iş” ilkelerine bağlı kalmalarının önemini vurgulamaktadır [12].

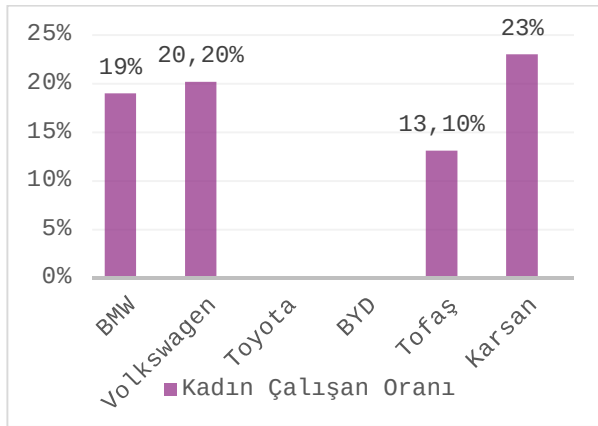
BMW, 2024 raporunda çalışanlarının gelişimine yönelik kapsamlı eğitim programları sunduğunu belirtmiştir. Şirket, çalışan başına yıllık ortalama 29 saat eğitim sağlandığını rapor etmiştir [7]. Ayrıca BMW, çeşitlilik ve kapsayıcılık politikaları kapsamında kadın yönetici oranını 2030 yılına kadar %30’un üzerine çıkarma hedefini paylaşmıştır. İş sağlığı ve güvenliği (İSG) alanında ise şirket, iş kazalarının önlenmesine yönelik dijital izleme sistemleri geliştirmiştir. Volkswagen, sosyal boyutta özellikle iş gücü çeşitliliği ve sendikal haklara verdiği önemle öne çıkmaktadır. Şirketin 2024 raporunda, kadın çalışan oranının %21 olduğu, yönetici pozisyonlarında ise bu oranın %19 olduğu belirtilmiştir [9]. Volkswagen ayrıca çalışanlarına yönelik

yeniden beceri kazandırma programları başlatmış, elektrikli araç dönüşümünün getirdiği yeni iş kollarına yönelik eğitim yatırımlarını artırmıştır.

Toyota, 2024 Sürdürülebilirlik Veri Kitabı'nda çalışanlarının refahına yönelik önlemleri detaylandırmıştır. Şirket, iş sağlığı ve güvenliği kültürünü güçlendirmek amacıyla “Zero Accident” yaklaşımını benimsemiş, çalışan katılımını artırmaya yönelik uygulamalar geliştirmiştir [10]. Çeşitlilik alanında ise kadın çalışan oranının artırılması için hedefler konmuş, özellikle yönetim kademelerinde kadınların temsilinin yükseltilmesi için somut adımlar atılmıştır.

BYD, Çin merkezli bir üretici olarak hızla büyüyen iş gücüne sahiptir. 2023 raporunda, çalışanlarına yönelik mesleki eğitim programları sunduğunu, özellikle elektrikli araç teknolojileri konusunda uzmanlaşmayı teşvik ettiğini bildirmiştir [11]. Ancak BYD raporlarında kadın çalışan oranı veya İSG göstergeleri sınırlı düzeyde açıklanmıştır. (Tofaş, 2024 Faaliyet Raporu'nda çalışanlarının mesleki gelişimine verdiği önemi vurgulamış ve toplam eğitim saatlerini açıklamıştır. Rapora göre 2023 yılında çalışan başına düşen ortalama eğitim süresi 17 saat olmuştur [5]. Tofaş ayrıca kadın çalışan oranını artırmaya yönelik çeşitli projeler yürütmekte, ancak yönetici kademelerinde bu oran henüz sınırlı düzeydedir.

Karsan, sosyal boyutta özellikle kapsayıcılık ve iş sağlığı önlemleri ile dikkat çekmektedir. 2024 Entegre Raporu'nda kadın çalışan oranının %23 olduğu, yönetim seviyesinde bu oranın %18'e ulaştığı belirtilmiştir [6]. Şirket ayrıca elektrikli araç dönüşümü kapsamında çalışanlarının becerilerini geliştirmek amacıyla yeniden eğitim programları başlatmıştır. İSG alanında ise iş kazalarının azaltılması yönünde kapsamlı politikalar geliştirilmiştir. Aşağıdaki tabloda incelenen şirketlerin sosyal göstergeleri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.



Şekil 4. Kadın Çalışan Oranları

Şekil 4'teki grafikte kadın çalışan oranları karşılıklı olarak verilmiştir. Toyota ve BYD'nin raporlarında kesin belirtilen bir oran, ya da oranlanabilecek sayılar olmadığından dolayı grafiğe konulamamıştır.

Tablo 3. Sosyal Göstergeler ve Hedefler

Şirket	Kadın Çalışan Oranı	Kadın Yönetici Oranı	Eğitim Saati (yıllık)	İSG Stratejisi
BMW	%19	%30 (2030 hedefi)	Belirtilmemiş	Dijital izleme sistemleri
VW	%20,2	%19	Belirtilmemiş	Yeniden beceri kazandırma
Toyota	Belirtilmemiş	Hedefler artış yönlü	Belirtilmemiş	“Zero Accident” yaklaşımı
BYD	Belirtilmemiş	Belirtilmemiş	Teknik eğitimler	Sınırlı bilgi
Tofaş	%13,1	Daha düşük oran	17 saat	İSG projeleri
Karsan	%23	%18	Belirtilmemiş	Elektrikli dönüşüm eğitimleri

Tabloda görüldüğü üzere, BMW eğitim saati ve kadın yönetici oranı hedefleri ile öne çıkarken, Volkswagen ve Toyota yeniden beceri kazandırma ve iş güvenliği programlarıyla dikkat çekmektedir. Türkiye merkezli Tofaş ve Karsan ise kapsayıcılıkta ilerleme kaydetmekle birlikte hâlen Avrupa merkezli firmaların gerisindedir.

Mumcu ve Bakoğlu (2022), otomotiv sektöründe sosyal sürdürülebilirlik uygulamalarının “yerel toplumlara katkı, iş sağlığı ve güvenliği, eğitim” başlıkları altında yoğunlaştığını tespit etmiştir [4]. Bu bulgu, çalışmamızda da gözlemlenen sosyal uygulamaların küresel ölçekte ortak eğilimler taşıdığını göstermektedir. Demir (2024), Türkiye’de otomotiv sektöründe sosyal boyutun henüz çevresel uygulamalara kıyasla ikincil öneme sahip

olduğunu, ancak toplumsal beklentiler doğrultusunda hızla gelişmekte olduğunu ifade etmiştir [5]. Kamińska-Witkowska (2024), seçili otomotiv firmalarının raporlarında sosyal göstergelerin giderek ayrıntılandığını, özellikle çeşitlilik ve kapsayıcılık konularının öne çıktığını vurgulamıştır [6].

Türkiye merkezli otomotiv firmaları için sosyal boyut, uluslararası rekabet gücü açısından kritik bir alandır. Avrupa Birliği pazarında faaliyet gösteren firmaların çeşitlilik, eşitlik ve iş güvenliği göstergeleri konusunda şeffaf veriler sunmaları beklenmektedir. Bu nedenle Tofaş ve Karsan'ın kadın yönetici oranlarını artırmaya dönük stratejiler geliştirmeleri, eğitim saatlerini yükseltmeleri ve iş sağlığı politikalarını güçlendirmeleri gerekmektedir. Elektrikli araç dönüşümünün beraberinde getirdiği yeni beceri gereksinimleri, çalışanlara yönelik yeniden eğitim yatırımlarını zorunlu kılmaktadır.

3.4. YÖNETİŞİM

Kurumsal yönetim, sürdürülebilirlik çerçevesinde şirketlerin karar alma mekanizmalarının şeffaf, hesap verebilir, adil ve sorumlu biçimde işletilmesini ifade etmektedir. Yönetişim göstergeleri, yönetim kurulu yapısı, bağımsız üye oranı, etik ilkeler, yolsuzlukla mücadele politikaları, risk yönetimi sistemleri ve paydaşlarla ilişkilerin yönetilmesi gibi alanları kapsamaktadır. Uluslararası literatürde güçlü yönetim yapılarının çevresel ve sosyal performansı desteklediği, aynı zamanda yatırımcı güvenini artırdığı vurgulanmaktadır [13].

BMW, 2024 raporunda yönetim kurulu yapısını ayrıntılı biçimde açıklamış, bağımsız üye oranını %50'nin üzerinde tutmaya özen göstermiştir [7]. Şirket ayrıca etik uyum mekanizmalarını güçlendirmiş, çalışanlar için etik ihlal bildirim kanallarını anonim ve erişilebilir hale getirmiştir. BMW'nin raporunda, sürdürülebilirlik hedeflerinin doğrudan yönetim kurulu düzeyinde izlenip değerlendirildiği vurgulanmıştır.

Volkswagen, geçmişte yaşadığı emisyon skandalı sonrası yönetim alanında kapsamlı reformlara gitmiştir. 2024 raporunda, yönetim kurulu ve denetim komitelerinin bağımsızlığını artırmaya yönelik uygulamalar yer almaktadır [9]. Şirket, etik ihlal vakalarının bildirilmesi için dijital platformlar geliştirmiş ve çalışanların bu mekanizmalara güvenini artırmayı hedeflemiştir. Ayrıca risk yönetimi süreçlerinin sürdürülebilirlik göstergeleri ile entegre edildiği belirtilmiştir.

Toyota, kurumsal yönetim konusunda Japonya'nın Kurumsal Yönetişim Kodu'na uyum sağlamaktadır. 2024 raporunda bağımsız yönetim kurulu üyelerinin oranı %33 olarak verilmiş, ayrıca etik uyum eğitimlerinin düzenli olarak gerçekleştirildiği ifade edilmiştir [10]. Toyota ayrıca tedarik zinciri yönetiminde etik standartlara uyumu artırmaya yönelik mekanizmalar geliştirmiştir.

BYD, yönetim konusunda sınırlı düzeyde bilgi sunmaktadır. 2023 raporunda yönetim kurulu yapısına ilişkin sınırlı açıklamalar yer almakta, bağımsız üye oranı net biçimde belirtilmemektedir [11]. Bununla birlikte şirket,

etik uyum ve risk yönetimi politikalarının geliştirildiğini ifade etmektedir.

Tofaş, 2024 Faaliyet Raporu'nda yönetim kurulunun yapısını ve bağımsız üye oranını açıklamış, etik kurallara ilişkin politikalara yer vermiştir [5]. Ancak sürdürülebilirlik hedeflerinin yönetim kurulu düzeyinde izlenmesine yönelik mekanizmalar henüz sınırlı düzeydedir.

Karsan, 2024 Entegre Raporu'nda yönetim yapısına ilişkin ayrıntılı bilgilere yer vermiş, etik bildirim mekanizmalarının kurulduğunu belirtmiştir [6]. Ayrıca risk yönetimi sistemlerinin sürdürülebilirlik göstergeleri ile entegre edilmesi yönünde adımlar atıldığı görülmektedir.

3.4.3. Karşılaştırmalı Bulgular

Aşağıdaki tabloda incelenen şirketlerin yönetim göstergeleri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Tablo 4. Yönetişim Göstergeleri

Şirket	Bağımsız Üye Oranı	Etik İhlal Bildirim Mekanizması	Risk Yönetimi	Yönetim Kurulunda Sürdürülebilirlik
BMW	%50+	Anonim ve erişilebilir	Sürdürülebilirlik ile entegre	Doğrudan kurul düzeyinde takip
Volkswagen	%45	Dijital platform	Entegre risk yönetimi	Yönetim komiteleri aracılığıyla
Toyota	%33	Eğitimlerle destekli	Gelişmiş risk yönetimi	Raporlama ile kurul bağlantısı
BYD	Belirtilmemiş	Sınırlı açıklama	Geliştirilmekte	Belirtilmemiş
Tofaş	%33	Etik kuralları açıklanmış	Sınırlı entegrasyon	Henüz sınırlı düzeyde
Karsan	%30 civarı	Bildirim mekanizması mevcut	Geliştirilmekte	İlk adımlar atılmış

Tabloda görüldüğü üzere, Avrupa merkezli şirketler (BMW, Volkswagen) yönetim göstergelerinde daha gelişmiş yapılar sunmaktadır. Toyota, tedarik zinciri odaklı yönetim uygulamaları ile öne çıkarken, BYD sınırlı düzeyde açıklama yapmaktadır. Türkiye merkezli Tofaş ve Karsan ise yönetim alanında ilerleme kaydetmekle birlikte, sürdürülebilirlik hedeflerinin yönetim kurulu düzeyinde takip edilmesi konusunda hâlen gelişime ihtiyaç duymaktadır.

Tóth ve arkadaşları (2024), Avrupa otomotiv firmalarının yönetim yapıları ile yeşil yatırımlar arasında doğrudan bir ilişki bulunduğunu, güçlü kurumsal yönetim uygulamalarının çevresel yatırımları artırdığını belirtmişlerdir [7]. Bu bulgu, çalışmamızda elde edilen

verilerle uyumludur; zira BMW ve Volkswagen gibi güçlü yönetim yapısına sahip firmaların çevresel hedeflerinde daha iddialı oldukları görülmektedir. Mumcu ve Bakoğlu (2022) ise yönetim göstergelerinin, şirketler arasında benzerleşme eğilimi gösterdiğini, bu durumun küresel otomotiv sektöründe ortak bir sürdürülebilirlik dili oluşturduğunu ifade etmiştir [4].

Türkiye merkezli otomotiv firmalarının yönetim yapıları, uluslararası standartlara uyum açısından gelişim göstermektedir. Ancak AB pazarına ihracat yapan bu şirketlerin, sürdürülebilirlik hedeflerini yönetim kurulu düzeyinde kurumsallaştırmaları, bağımsız üye oranlarını artırmaları ve etik uyum mekanizmalarını güçlendirmeleri gerekmektedir. Bu gelişmeler, yalnızca uluslararası piyasalarda rekabet gücü sağlamakla kalmayacak, aynı zamanda yatırımcı güvenini ve paydaş ilişkilerini de güçlendirecektir.

4. SONUÇ

Bu çalışmada, otomotiv sektöründe faaliyet gösteren altı şirketin (BMW, Volkswagen, Toyota, BYD, Tofaş ve Karsan) yayımlanmış oldukları sürdürülebilirlik raporları incelenmiş ve çevresel, sosyal, yönetim ve şeffaflık boyutlarında karşılaştırmalı bir değerlendirme yapılmıştır. Elde edilen bulgular, otomotiv sektöründe sürdürülebilirlik uygulamalarının küresel ölçekte giderek daha benzer hale geldiğini, bununla birlikte bölgesel ve kurumsal farklılıkların da devam ettiğini göstermektedir.

Şeffaflık boyutunda Avrupa merkezli şirketlerin (BMW, Volkswagen) uluslararası standartlara yüksek uyum sağladıkları ve bağımsız güvence süreçlerini raporlamalarına entegre ettikleri görülmüştür. Toyota gönüllü standartları çeşitlendirerek küresel ölçekte paydaş beklentilerini karşılamayı hedeflemiş, BYD ise raporlama çerçevesinde ilerleme kaydetmekle birlikte bağımsız doğrulama mekanizmalarında geride kalmıştır. Türkiye merkezli şirketler Tofaş ve Karsan, şeffaflık alanında ilerleme göstermelerine rağmen bağımsız güvence uygulamaları açısından hâlen gelişim sürecindedir.

Çevresel boyutta, BMW ve Volkswagen'in iddialı emisyon azaltım hedefleri ve yenilenebilir enerji yatırımları dikkat çekmektedir. Toyota, 2050 Çevresel Hedefleri kapsamında su pozitif şirket olmayı hedeflemiş, BYD ise elektrikli araç üretimindeki liderliği ile öne çıkmıştır. Türkiye merkezli şirketlerden Tofaş enerji verimliliği ve atık yönetimi konusunda somut ilerlemeler kaydetmiş, Karsan ise elektrikli otobüs üretimi ve karbon nötrlük hedefleri ile çevresel stratejilerini geliştirmiştir.

Sosyal boyutta, BMW ve Volkswagen çalışan çeşitliliği, iş sağlığı ve yeniden beceri kazandırma programlarıyla öne çıkarken; Toyota iş sağlığı ve güvenliği kültürünü güçlendirmeye odaklanmıştır. BYD çalışanlarına yönelik teknik eğitimlere yer vermiş, ancak sosyal göstergelerin şeffaf raporlanması sınırlı kalmıştır. Türkiye merkezli şirketler arasında Tofaş eğitim sürelerini artırmaya çalışmış, Karsan ise kapsayıcılık oranlarında ilerleme kaydetmiştir.

Yönetim boyutunda, BMW ve Volkswagen güçlü kurumsal mekanizmalar geliştirmiş, bağımsız üye oranlarını

yükseltmiş ve risk yönetimini sürdürülebilirlik göstergeleri ile entegre etmiştir. Toyota, Japonya Kurumsal Yönetişim Kodu'na uyum sağlamış, tedarik zinciri yönetiminde etik standartlara önem vermiştir. BYD'nin yönetim göstergeleri sınırlı kalmış, Türkiye merkezli Tofaş ve Karsan ise yönetim mekanizmalarını geliştirmeye devam etmektedir.

Akademik literatür ile karşılaştırıldığında, Mumcu ve Bakoğlu (2022) tarafından vurgulanan şirketler arası benzerleşme eğiliminin bu çalışmada da gözlemlendiği sonucuna ulaşılmıştır [4]. Demir (2024), Türkiye'de ekonomik ve ekolojik sürdürülebilirlik uygulamalarının dengeli biçimde ilerlemesinin önemini belirtmiş, bu noktada şeffaf raporlama süreçlerinin geliştirilmesinin zorunluluğunu ortaya koymuştur [5]. Kamińska-Witkowska (2024) ve Tóth vd. (2024) tarafından yapılan çalışmalarda küresel firmaların raporlamalarında uluslararası standartların giderek öne çıktığı ve güçlü yönetim yapılarının çevresel yatırımları artırdığı saptanmıştır [6-7]. Sonuç olarak, otomotiv sektöründe sürdürülebilirlik uygulamaları giderek daha fazla kurumsallaşmakta, çevresel ve sosyal göstergeler uluslararası standartlar etrafında yoğunlaşmakta, yönetim mekanizmaları yatırımcı güvenini artıracak şekilde güçlendirilmektedir. Türkiye merkezli firmalar, çevresel ve sosyal göstergelerde ilerleme kaydetmekle birlikte, şeffaflık ve yönetim alanlarında gelişim sürecini sürdürmektedir. Bunun ışığında uluslararası rekabet gücünün artırılabilmesi için Türk otomotiv sektörünün bağımsız güvence uygulamalarını yaygınlaştırması, yönetim yapısını güçlendirmesi ve çevresel hedeflerini daha iddialı hale getirmesi gerekmektedir.

5. REFERANSLAR

- [1] International Energy Agency (IEA), "CO₂ Emissions from Fuel Combustion," Paris, 2023.
- [2] European Commission, "The European Green Deal," COM(2019) 640 final, Brussels, 2019.
- [3] Türkiye İhracatçılar Meclisi (TİM), "2023 Otomotiv Sektörü İhracat Verileri," Ankara, 2024.
- [4] A. Y. Mumcu, R. Bakoğlu, Otomotiv sektöründe kurumsal sürdürülebilirlik uygulamalarının eşbenzeşmesi üzerine bir araştırma: BMW, Toyota, Ford örneği, Gümüşhane Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, cilt 11, sayı 2, 2022.
- [5] A. Demir, Otomotiv sektöründe ekonomik ve ekolojik sürdürülebilirlik, Ekonomi ve Yönetim Araştırmaları Dergisi, cilt 12, sayı 2, 2024.
- [6] A. Kamińska-Witkowska, Sustainability reporting in selected automotive companies, Engineering Management in Production and Services, cilt 16, sayı 3, 2024.
- [7] Á. Tóth, A. Suta, F. Szauter, E. Lukács, Quantitative analysis of green investments in European automotive companies, Clean Technologies and Environmental Policy, Springer, 2024.

- [8] S. Yıldırım, H. Şimşek, Sosyal Bilimlerde Nitel Araştırma Yöntemleri, Seçkin Yayıncılık, Ankara, 2021.
- [9] Volkswagen AG, Annual Report 2024, Wolfsburg, 2024.
- [10] Toyota Motor Corporation, Sustainability Data Book 2024, Tokyo, 2024.
- [11] BYD Co. Ltd., CSR Report 2023, Shenzhen, 2023.
- [12] International Labour Organization (ILO), *Decent Work and Sustainable Development Goals*, Cenevre, 2022.

Destekleyen Kurum ve Firmalar



alagan.
partners



OTOMOTİV KONGRE ve SERGİSİ

05 - 06 Aralık 2025
BAOB Yerleşkesi • Bursa