MÜHENDİSLİK ALANINDA GELİŞMELER

EDİTÖR
PROF. DR. BİROL KILIÇ

DOI:10.5281/zenodo.14576846

Mühendislik Alanında Gelişmeler

Editör
Prof. Dr. Birol Kılıç

İmtiyaz Sahibi
Platanus Publishing®

Editör
Prof. Dr. Birol Kılıç

Kapak & Mizanpaj & Sosyal Medya
Platanus Yayın Grubu

Birinci Basım
Aralık, 2024

Yayımcı Sertifika No
45813

Matbaa Sertifika No
47381

ISBN
978-625-6634-59-6

©copyright
Bu kitabın yayım hakkı Platanus Publishing'e aittir.
Kaynak gösterilmeden alıntı yapılamaz, izin
alınmadan hiçbir yolla çoğaltılamaz.

Adres:Natoyolu Cad. Fahri Korutürk Mah. 157/B,
06480, Mamak, Ankara, Türkiye.
Telefon: +90 312 390 1 118
web: www.platanuskitap.com
e-mail: platanuskitap@gmail.com



PLATANUS PUBLISHING®

İÇİNDEKİLER

BÖLÜM 1 9

SÜRDÜRÜLEBİLİR ÇİMENTO ÜRETİMİ İÇİN LC3 TEKNOLOJİSİNİN POTANSİYELİ
Nazım Çağatay Demiral & Cenk Karakurt

BÖLÜM 2 27

DEĞİŞEN İKLİM KOŞULLARINDA DÜNYA VE TÜRKİYE'DE SU KAYNAKLARININ AKIBETİ
Olcay Gülçiçek Uysal

BÖLÜM 3 47

ŞANLIURFA ÇÖRTLERİNİN MİNERALOJİSİ, PETROGRAFİSİ, JEOKİMYASI VE SÜSTAŞI OLARAK KULLANILABİLİRLİĞİ
İlkay Kaydu Akbudak & Zeynel Başıbüyük

BÖLÜM 4 59

750 KWE, 993 KWP GÜCÜNDE BİR GÜNEŞ ENERJİSİ SANTRALİ İÇİN ÖN DEĞERLENDİRME ANALİZİ VE SİMÜLASYONU
Furkan Dinçer

BÖLÜM 5 71

AZİMUT AÇISININ GÜNEŞ ENERJİSİ SANTRALİ ÜRETİMİNDE PERFORMANSA ETKİSİNİN ANALİZ EDİLMESİ
Furkan Dinçer

BÖLÜM 7 81

BİTÜM MODİFİKASYONUNDA POLİPROPİLEN KULLANIMI: BİR LİTERATÜR TARAMASI
Nimet İnkaya

BÖLÜM 8 105

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİNDE GÖRÜNTÜ İŞLEME UYGULAMALARI
Batuhan Aykanat

BÖLÜM 9 113

BAZALT AGREGALARININ TEKRARLI YÜKLER ALTINDAKİ PLASTİK ŞEKİL DEĞİŞTİRME ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ
Altan Yılmaz

BÖLÜM 10 127

ATATEK-SOLAR YAZILIMI İLE ADANA İLİNİN GLOBAL GÜNEŞ RADYASYONUNU TAHMİN EDEN MODELLERİN OPTİMİZASYONU
Recep Külcü & Ahmet Süslü

BÖLÜM 11 137

ORTA ANADOLU'DAKİ KALSEDON OLUŞUMLARINA ÖRNEKLER
Meltem Gürbüz & Başak Bektaş 137

BÖLÜM 12 153

MN KATKILI ZNO-TiO_2 ÇEKİRDEK-KABUK NANOKOMPOZİTLERİN YAPISAL, OPTİK VE FOTOKATALİTİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ: ERİOCHROME BLACK T'NİN BOZUNDURULMASINDA YENİ YAKLAŞIMLAR
Meltem Gürbüz

BÖLÜM 13 163

JEOLOJİK AÇIDAN GRANİTOYİDLER
Gizem Arslan

BÖLÜM 14 173

TURUNÇGİLLER VE İÇERDİKLERİ BİYOAKTİF BİLEŞENLER
Şelale Öncü Glaue

BÖLÜM 15 191

TÜRKİYE VE AVRUPA BİRLİĞİ ÜLKELERİNDEKİ İŞ GÜVENLİĞİ MEVZUATININ YÜKSEKTE ÇALIŞMALAR ÖZELİNDE KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ
Gökhan Değirmencioğlu & Osman Aytekin & Hakan Kuşan

BÖLÜM 16 213

FONKSİYONEL DERECELENDİRİLMİŞ MALZEMELER VE BU MALZEMELERİN EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİYLE ÜRETİMİ
Yusuf Fedai & Hediye Kırlı Akın

BÖLÜM 17 231

OTOBÜS YOLCU KOLTUKLARININ GÜVENLİĞİ İÇİN YAPISAL İYİLEŞTİRME SÜRECİ: R80 DİNAMİK TESTİ VE SONUÇLARI
Buse Kaya & Metin Öz

BÖLÜM 18 269

ASFALT KAPLAMALARDA OLUŞAN BOZULMALARDA ÜSTYAPI YÖNETİM SİSTEMLERİNİN ÖNEMİ
Nimet İnkaya

BÖLÜM 19 285

DÜNYA VE TÜRKİYE ÇİMENTO FABRİKALARINDA CO_2 KAYNAKLARI, ETKİLERİ VE AZALTIM STRATEJİLERİ
Fatma Dikçal Akarsu & Halil Dertli & Didem Saloğlu Dertli

BÖLÜM 20 315

MAGNEZYUM METALİNİN JANT ÜRETİMİNDE KULLANILMASI
Aydın Şık & Emre Benzer

BÖLÜM 21 343

KARBON AYAK İZİNİN BİBLİYOMETRİK DEĞERLENDİRMESİ
Abdullah Yinanç

BÖLÜM 22 355

DİKEY TARIM TEKNOLOJİLERİNİN GELECEĞİ VE COĞRAFİ BİLGİ SİSTEMLERİNİN DİKEY TARIM YER SEÇİMİNDEKİ ROLÜ
Büşra Yılmaz & Murat Oturakçı & Uğur Eliiyi & Deniz Türsel Eliiyi

BÖLÜM 23 373

AĞIR METAL GİDERİMİNDE YAPAY ZEKANIN KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI
Ayşegül Yücel

BÖLÜM 24 385

PLASTİK ENJEKSİYON KALIPLARINDA KALIP VE ERGİMİŞ PLASTİK SICAKLIĞININ ENJEKSİYON SÜRELERİNE OLAN ETKİSİNİN SONLU ELEMANLAR METODU İLE ANALİZİ
Cebeli Özek & Yahya Hışman Çelik

BÖLÜM 25 415

TOPLU ULAŞIMDA SÜRDÜRÜLEBİLİR ÜCRET TOPLAMA SİSTEMLERİ
Metin Çancı & Çiğdem Avcı Karataş

BÖLÜM 26 439

COMMER TS3 DİZEL MOTORU İÇİN BİYEL KOLU OPTİMİZASYONU VE GERİLME ANALİZİ
Necati Koçak & Hüseyin Uzun &Nuri Ergin

BÖLÜM 27 461

SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE KOMPOZİT MALZEME TASARIMINDA DENEYSEL VE SİMÜLASYON SÜREÇLERİNİ KISALTABİLECEK FARKLI BİR YAKLAŞIM VE BİR UYGULAMA
Mehmet Çalışkan

BÖLÜM 28 479

VERMİKOMPOST ÜRETİM YÖNTEMLERİ
Hüdaverdi Arslan & Mutlu Yalvaç

BÖLÜM 29 501

CAMİLERDE İŞ SAĞLIĞI VE GÜVENLİĞİ UYGULAMALARI
Arda Yılmaz

BÖLÜM 30 517

SPOR AYAKKABI ÜRETİMİNDE MALZEME TEKNOLOJİSİ
Selma Özarslan & Gülşah Germen Tutaş & Hüseyin Şevik

BÖLÜM 31 531

METASEZGİSEL OPTİMİZASYON ALGORİTMALARININ CEC2019 ÖLÇÜTLERİNE GÖRE PERFORMANS ANALİZİ

Rabia Uyar

BÖLÜM 31 545

TARAMALI ELEKTRON MİKROSKOP TEKNOLOJİSİNDE GELİŞMELER

Gülşah Germen Tutaş & Esra Kılavuz

BÖLÜM 32 567

TARIM TOPRAKLARINDAKİ EMİSYONLARIN AZALTILMASI VE TOPRAK YÖNETİMİ

Binnaz Zeynep Zaimoğlu

BÖLÜM 33 581

İŞ SAĞLIĞI VE GÜVENLİĞİ (İSG) RİSK DEĞERLENDİRMESİNDE ÖNEMLİ BİR TEKNİK: HATA TÜRLERİ VE ETKİLERİ ANALİZİ (FMEA)

İsmail Bentli & Senem Şanlı

BÖLÜM 34 597

BİR YAYLA EVİNİN ELEKTRİK ENERJİSİ İHTİYACINI KARŞILAYACAK ŞEBEKEDEN BAĞIMSIZ FOTOVOLTAİK SİSTEM TASARIMI

Abtullah Tuğcu & Nuri Ceylan & Ahmet Uslu

BÖLÜM 35 617

MODERN MÜHENDİSLİK UYGULAMALARI VE GELECEK PERSPEKTİFLERİ: MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ VE YAPAY ZEKÂ

Cebeli Özek

BÖLÜM 36 633

KONUT BİNALARINDA ÇATI ÜSTÜ GÜNEŞ FOTOVOLTAİK POTANSİYELİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ ÜZERİNE BİR ARAŞTIRMA

Ahmet Uslu & Abtullah Tuğcu

BÖLÜM 37 651

OTOMOTİV SEKTÖRÜNDE KULLANILAN HİBRİT KOMPOZİT MALZEMELER

Sevim Geçici & Ceyhun Yapıcı &Murat Makaracı

BÖLÜM 38 675

KUANTUM KRİPTOGRAFİ: TARİHİ, TEMELLERİ VE GELECEĞİ

Melike Karatay & Onur Uğurlu

BÖLÜM 39 687

MİKROBİYAL GÜBRELERİN ÇEVREYE ETKİLERİ
Gözde Hafize Yıldırım

BÖLÜM 40 693

ORGANİK GÜBRE HAZIRLAMA SÜREÇLERİ
Gözde Hafize Yıldırım

BÖLÜM 41 699

ELEKTRİKLİ ARAÇ TEKNOLOJİSİ VE İÇTEN YANMALI MOTORLU ARAÇLARIN ELEKTRİKLİ ARAÇLARA DÖNÜŞÜMÜ
Kadir Olcay & Samet Giray Tunca & Mustafa Arif Özgür

BÖLÜM 42 715

SAVİKA: YAPAY ZEKÂ DESTEKLİ İNSANSIZ KARA ARACI TASARIM PROGRAMI
Cüneyd Demir & Mustafa Bozdemir

BÖLÜM 43 731

İNSANSIZ KARA ARAÇLARI İÇİN TASARIM KATALOGU GELİŞTİRİLMESİ
Cüneyd Demir

BÖLÜM 44 763

Fatma Hepsağ & Sevde Nur Tanç

BÖLÜM 45 771

YER FISTIĞINDA BULUNAN PROTEİNLER VE ÖNEMİ
Fatma Hepsağ & Sevde Nur Tanç

BÖLÜM 46 779

HEDEF ODAKLI KİMLİK AVI SALDIRILARI: SALDIRI YÖNTEMİ VE ÖNLEME YOLLARI
Sudenur Muratoğulları Semih Çakır

BÖLÜM 47 793

ENERJİ SİMÜLASYONU İLE BUTİK OTEL TASARIMI: MARMARİS İÇİN OPTİMUM ÇÖZÜM
Hazal Boydak Demir Figen Balo

BÖLÜM 48 805

ZEMİN SIVILAŞMASI: MEKANİZMASI, RİSK DEĞERLENDİRMESİ VE ÖNLEME YÖNTEMLERİ
Mehmet Hayrullah Akyıldız



Sürdürülebilir Çimento Üretimi için LC3 Teknolojisinin Potansiyeli

Nazım Çağatay Demiral[1] & Cenk Karakurt[2]

[1] Arş. Gör.; Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü. ORCID No: 0000-0001-5927-7299
[2] Prof. Dr.; Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü. ORCID No: 0000-0002-4204-5341

1. Giriş

Dünya genelinde hızla artan kentleşme ve sanayileşme faaliyetleri, doğal kaynakların hızla tükenmesine ve çevresel bozulmaların büyümesine neden olmaktadır. Bu süreç, özellikle inşaat sektöründe kendini belirgin bir şekilde göstermekte ve sektör, doğal kaynakların yoğun tüketimi ve sera gazı emisyonlarının başlıca kaynaklarından biri olarak öne çıkmaktadır (UNEP, 2019). İnşaat faaliyetleri sırasında kullanılan beton ve çimento üretim süreçleri, çevre üzerinde olumsuz etkiler bırakmakta ve hammaddelerin çıkarılması, işlenmesi sırasında bu etkiler daha da belirgin hale gelmektedir. Bu durum, betonun dünya genelinde en çok kullanılan yapı malzemesi olmasından kaynaklanmaktadır ve küresel çimento tüketimindeki artış eğilimi, çevresel sorunları daha da büyütmektedir (IEA, 2020). Örneğin, küresel çimento üretiminin 2020 yılında yaklaşık 4,1 milyar tona ulaştığı ve bu üretimin büyük bir kısmının Türkiye, Çin gibi gelişmekte olan ülkelerde gerçekleştiği bilinmektedir (Ige vd., 2024; CEMBUREAU, 2021). Türkiye dünyada çimento tüketimi konusunda yedinci sırada yer almaktadır (Oral ve Saygın, 2019). Bu üretim hacmi, yüksek miktarda enerji tüketimi ve çevresel bozulmayı beraberinde getirmektedir. Özellikle kentsel alanlardaki artan yapılaşma ve altyapı projeleri, doğal kaynakların yoğun kullanımını zorunlu kılmakta, bu da hem çevresel hem de ekonomik sürdürülebilirliği tehdit eden bir durum yaratmaktadır. Bu noktada, inşaat sektörü, sürdürülebilir çözümler geliştirmek zorundadır.

Küresel ısınma, insan faaliyetlerinin neden olduğu sera gazı emisyonlarının bir sonucu olarak, dünya üzerinde ciddi bir tehdit oluşturmaktadır. Atmosferdeki sera gazı konsantrasyonlarının artması, fosil yakıtların yakılması, ormansızlaşma ve sanayi faaliyetleri gibi insan kaynaklı faktörlere bağlanmaktadır. Paris Anlaşması gibi uluslararası anlaşmalar, küresel sıcaklık artışını 1.5°C ile sınırlamayı hedeflerken, bu hedefe ulaşmak için özellikle sanayi sektörlerinde büyük ölçekli değişikliklerin yapılması gerekmektedir (IPCC, 2020). Bu bağlamda, çimento üretimi, dünya genelinde fosil yakıtların yakılmasından sonra en büyük üçüncü karbon emisyonu kaynağı olarak insanlığın karşısına çıkmaktadır (Worrell vd., 2001). Çimento üretimi, sera gazı emisyonlarının yaklaşık %7'sinden sorumlu olup, özellikle Portland çimentosunun üretim süreçleri, büyük miktarlarda CO_2 salınımına neden olmaktadır (Latawiec vd., 2018). Portland çimentosu üretimi sırasında ortaya çıkan bu emisyonlar, kireçtaşının ayrışması, fosil yakıtların kullanımı ve diğer endüstriyel süreçlerden kaynaklanmaktadır. Bu emisyonların yüksek seviyeleri, küresel iklim değişikliğine katkıda bulunmakta ve çevresel sürdürülebilirlik ile toplum sağlığı üzerinde ciddi olumsuz etkiler yaratmaktadır

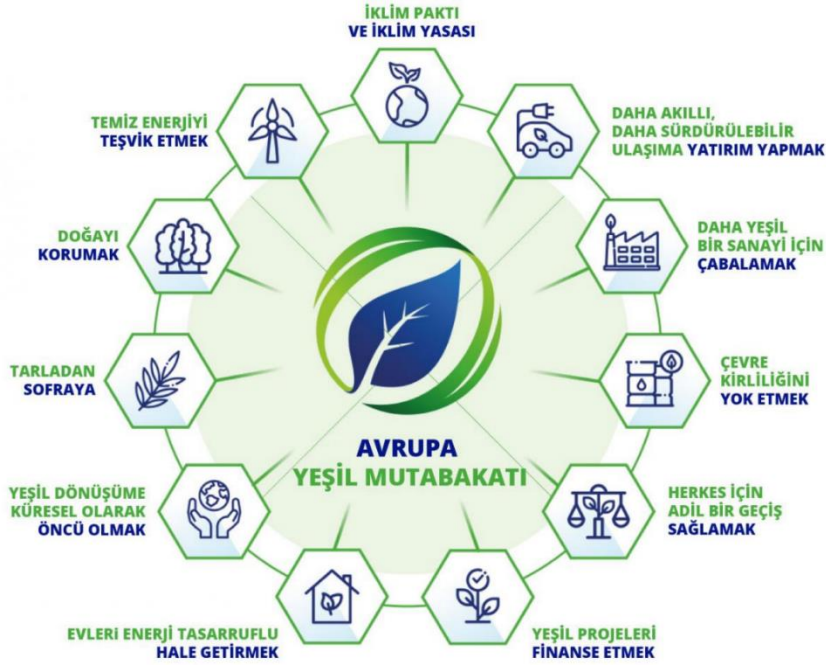
(Barcelo vd., 2014). Yapılan araştırmalar, çimento üretim süreçlerinden kaynaklanan karbon emisyonlarının, toplam insan kaynaklı emisyonların %5 ila %8'ini oluşturduğunu göstermektedir (Miller ve Moore, 2020). Bu bağlamda, çimento üretim süreçlerinin yeniden gözden geçirilmesi ve çevresel etkilerini azaltacak yenilikçi çözümlerin geliştirilmesi büyük bir önem taşımaktadır. Literatürde, düşük enerji tüketimi olan ve çevre dostu yeni nesil bağlayıcılar üzerinde yapılan araştırmalar, bu konuda umut vaat etmektedir. Ancak Türkiye'de, çimento üretim süreçlerinde seçilen hammaddeler, bu gelişmelerin endüstrideki uygulamalara henüz tam anlamıyla yön veremediğini göstermektedir. Tablo 1'de görüldüğü gibi 2022 yılında Türk çimento sektörü, 73,7 milyon ton üretim ile G-20 ülkeleri arasında dördüncü sırada yer almıştır (Cembureau, 2024).

Tablo 1. G-20 ülkelerinin yıllara göre çimento üretimi (milyon ton)

Ülke	**2015**	**2016**	**2017**	**2018**	**2019**	**2020**	**2021**	**2022**
Çin	2350	2403	2316,3	2176,7	2300	2376,9	2362,8	2118
Hindistan	270	289,3	285	327,7	320	290	351,6	387,6
AB	167,2	169,1	175,1	179,8	182,1	171,5	182,5	175,8
ABD	83,4	84,7	86,1	87,8	88,6	89,3	93	93
Brezilya	72	57,6	54	53,5	53,4	61,1	65,9	63,6
Türkiye	71,4	75,4	80,6	72,5	57	72,3	78,9	73,7
Rusya	69	55	54,7	53,7	54,1	55,8	60,1	60,8
Endonezya	65	61,3	68	70,8	64,2	64,8	69,2	69,5
Güney Kore	52	56,7	57,9	55	56,4	47,5	50,4	51,1
Japonya	55	53,4	60,8	60,1	58,3	51,1	50,2	48,9
Suudi Arabistan	55	55,9	55,9	47,1	42,2	53,4	53,7	52,6
Meksika	39,8	42,2	42,4	42,8	47,5	41,9	45,2	43,9

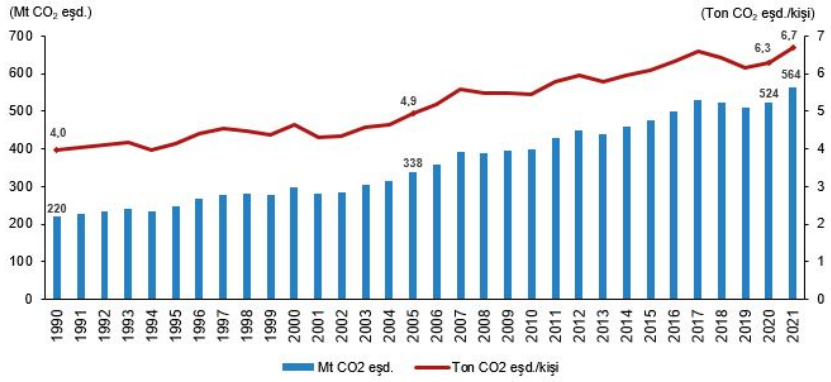
Almanya	31,1	31,7	32,7	34	34,2	35,5	35	32,9
İtalya	20,8	19,3	19,3	19,3	19,2	19,1	20,6	18,8
Fransa	15,6	15,9	16,5	16,9	16,5	16,7	17,5	16,8
Güney Afrika	13,4	13,2	13,3	13,2	12,4	13,3	13,4	13,3
Kanada	12,5	12,5	12,7	12,3	13,3	13,3	13,4	14
Arjantin	12	11,8	12	12	11,5	9,9	12,1	13
İngiltere	9,6	9,4	9,2	9,1	9,8	9,4	9	8,4
Avusturya	9,3	9,8	10	10	9,6	9,6	9,6	10,1
İspanya	15,1	15	16,1	16,6	17,4	16,2	18,6	18,5

Türkiye'nin çimento üretimi yıllar içerisinde istikrarlı bir artış göstermiştir. 2001 yılında 35,9 milyon ton olan üretim, 2022'de 73,7 milyon tona ulaşmıştır. Özellikle 2010 ile 2017 yılları arasında üretimde belirgin bir artış gözlemlenmiştir; 2010'da 62,7 milyon ton olan üretim, 2017'de 80,6 milyon tona çıkmıştır. 2022 yılına geldiğimizde, Türkiye 73,7 milyon ton çimento üretimi ile dünya genelinde orta seviyede bir üretici konumundadır. Bu rakam, Rusya (60,8 milyon ton), Almanya (32,9 milyon ton) ve Meksika (43,9 milyon ton) gibi ülkeleri geride bırakırken, Çin (2118 milyon ton), Hindistan (387,6 milyon ton) ve Amerika Birleşik Devletleri (93 milyon ton) gibi büyük üreticilerin gerisinde kalmaktadır. Bu karşılaştırma, Türkiye'nin global çimento pazarındaki stratejik konumunu göstermekte ve özellikle gelişmiş ülkelerle kıyaslandığında Türkiye'nin üretim kapasitesinin belirli bir seviyede olduğunu ortaya koymaktadır. Ancak bu üretim oranlarına rağmen, Türkiye'de düşük karbon ayak izine sahip çimentoların üretimi oldukça sınırlıdır. Çimento sektörünün, Türkiye'nin karbon emisyonlarında önemli bir paya sahip olduğu göz önüne alındığında, Paris Anlaşması çerçevesinde karbon emisyonlarını %21 oranında azaltmayı taahhüt eden Türkiye'nin, çimento üretim süreçlerini yeniden yapılandırması büyük önem taşımaktadır (Özerdem, 2024). Mutabakat kapsamında Türkiye'nin daha yeşil bir sanayi, çevre kirliliğini tamamen kaybetmek, çevreci projelere finansal destek vermek ve doğayı korumak gibi birçok parametreyi aynı anda sağlaması gerekmektedir (Şekil 1).



Şekil 1. Avrupa yeşil mutabakatı kapsamında Türkiye'yi bekleyen yenilikler (INDEPENDENT, 2021).

Şekil 2'de görüldüğü gibi 2021 yılı TÜİK verilerine göre, Türkiye'nin CO_2 eşdeğeri sera gazı emisyonu 564,4 milyon tona ulaşmıştır (TÜİK, 2023). Bu nedenle, ülkemizin karbon emisyonlarını kontrol altında tutmak için özellikle çimento endüstrisindeki karbon emisyonlarının azaltılması kritik bir öneme sahiptir. Bu noktada, çevresel sürdürülebilirliği sağlamak amacıyla yapılan araştırmalar, LC^3 çimentosu gibi düşük kalsinasyon sıcaklıklarında üretilen yeni nesil bağlayıcıların, geleneksel Portland çimentosuna kıyasla daha düşük CO_2 emisyonlarına neden olduğunu göstermektedir (Scrivener vd., 2018a). LC^3 çimentosu, kireçtaşı, kil ve alçıtaşı kombinasyonlarından oluşmakta olup, geleneksel çimento üretiminde kullanılan klinker miktarını azaltmakta ve bu sayede enerji tüketimini ve sera gazı emisyonlarını önemli ölçüde düşürmektedir (Manosa vd., 2024). Bu yenilikçi bağlayıcıların, Türkiye gibi gelişmekte olan ülkelerde yaygın bir şekilde kullanılmaya başlaması, inşaat sektörünün çevresel etkilerini hafifletmek için önemli bir adım olacaktır.

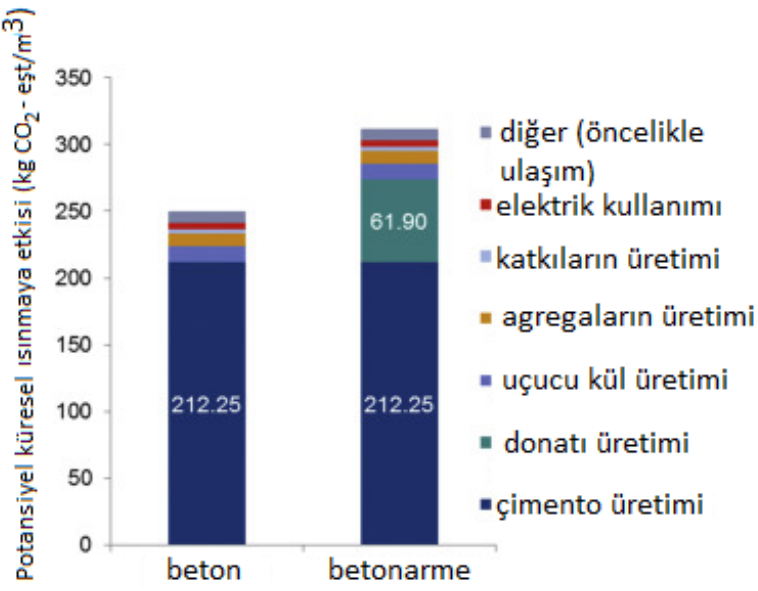


Şekil 2. Türkiye'de yılara göre CO_2 gazı emisyonları (TÜİK, 2023).

Bu çalışmanın amacı, LC^3 çimentolarının çevre dostu ve düşük CO_2 emisyonlu yapı malzemeleri üretimi üzerindeki etkileri incelenecektir. Özellikle Türkiye'deki çimento üretim süreçlerinin, çevresel sürdürülebilirlik ve karbon emisyonlarını azaltma hedefleri doğrultusunda yeniden değerlendirilmesi gerektiği düşünülmektedir. Bu kapsamda, LC^3 çimentosunun üretim sürecindeki yenilikçi yaklaşımlar ve bu bağlayıcının yaygın kullanım potansiyeli üzerine sunulan çözüm önerilerinin değerlendirilmesi yapılmıştır.

2. Yetersiz Hammaddeler ve Alternatif Çimento İkame Malzemeleri

Beton ve betonarme üretimi sırasında birçok yapı malzemesi birlikte kullanıldığından ortaya çıkar CO_2 emisyonu bütün bu yapı malzemelerine bağlı olarak değişmektedir. Şekil 3'te görüldüğü üzere beton ve betonarme üretiminde çimento, uçucu kül, donatı, agrega, katkı üretimleri ve elektrik kullanımları gibi birçok parametre CO_2 emisyonlarına sebep olmaktadır (Schneider, 2019). Çimento üretiminde, kireçtaşının parçalanması için gereken yaklaşık 1450°C'lik yüksek sıcaklıklar, enerji tüketiminin büyük bir kısmını oluşturur ve önemli seviyede karbon dioksit salınımına yol açar (Gartner & Hirao, 2015). 2022 yılında dünya çapında yıllık çimento tüketimi yaklaşık 4,2 milyar tona ulaşmış olup, bu miktar kişi başına yaklaşık 626 kg betona eşdeğerdir (IEA, 2023). Bu seviyedeki üretim, dünya genelinde üretilen gıdanın neredeyse yarısına denk gelirken, 2050 yılına kadar bu talebin 6 milyar tona ulaşması beklenmektedir (Scrivener vd., 2018b; Singh ve Subramaniam, 2019). Yüksek enerji talebi nedeniyle, fosil yakıtların yoğun kullanımı kaçınılmaz hale gelmiş olup, bu durum küresel ısınmayı artırmaya devam etmektedir. Çimento sektörü ise, bu sorunu azaltmak için uzun yıllardır uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve silis dumanı gibi mineral katkı maddelerini kullanarak kalsinasyon sıcaklıklarını düşürmeye çalışmaktadır (Habert et al., 2020).

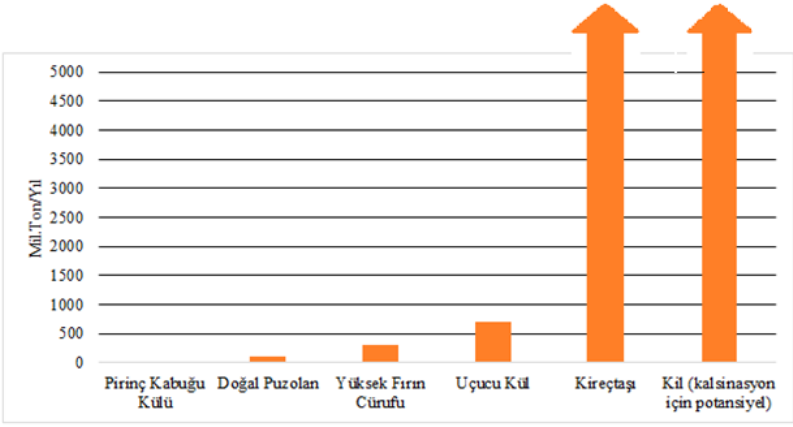


Şekil 3. Beton ve betonarmenin küresel ısınmaya etkisi (Schneider, 2019).

Mehta (2007), Sürdürülebilir Kalkınma Üzerine Beton Zirvesi'nde yaptığı sunumda, 2020 yılına kadar beton hacimlerinde beklenen büyüme ve sera gazı emisyonlarının azaltılmasına yönelik küresel gereklilikler ışığında beton endüstrisinin karşılaştığı zorlukları ele almıştır. 2020 yılına gelindiğinde, çimento üretimine olan talep azalmamış; aksine, Portland çimentosunun, yani betonun ana bağlayıcısının, dünya çapındaki üretimi 2018 yılında 4,1 Gt'u aşmış ve bu, yaklaşık 24 Gt'un üzerinde beton üretimine tekabül etmiştir (Schneider, 2019; U.S Geological Survey, 2019). Mehta (2007), sera gazı emisyonlarını 1990 yılı seviyelerine düşürmenin, normal Portland çimentolu beton kullanılarak imkânsız olduğunu, bunun ancak çimento ikame malzemelerinin (uçucu kül, cüruf vb.) ana bağlayıcı olarak kullanıldığı sistemlerle başarılabileceğini vurgulamıştır. Bu yenilikçi ve sürdürülebilir malzemeler hem çevresel etkileri azaltmakta hem de doğal kaynakların korunmasına katkıda bulunmaktadır. Bu ikame malzemelerin kullanımı, ayrıca atık miktarını da önemli ölçüde azaltmakta ve betonun performansını iyileştirerek yapıların hizmet ömrünü uzatmaktadır (Sıddıque ve Khan 2011).

Ancak, bu tamamlayıcı çimento malzemelerinin küresel rezervleri hızla azalmaktadır. Özellikle uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi katkı maddelerinin rezervleri, kömür tüketiminin azalması ve çelik üretimindeki dalgalanmalar nedeniyle giderek azalmaktadır. Uçucu kül, kömürle çalışan enerji santrallerinden

elde edilen bir yan ürün olduğundan, yenilenebilir enerjiye geçişle birlikte bu kaynak giderek azalmaktadır. Aynı şekilde, çelik üretiminin bir yan ürünü olan yüksek fırın cürufu üretimi, demir üretiminde olan dalgalanmalardan doğrudan etkilenmektedir. Yüksek fırın cürufu, çimento üretiminde klinker yerine yüksek oranlarda ikame edilerek çimento ve beton üretiminde yaygın olarak kullanılan, literatürde kendini kanıtlamış bir çimento ikame malzemesidir. Ancak, dünya genelinde mevcut yüksek fırın cürufu miktarı yaklaşık 330 milyon ton/yıl ile sınırlıdır. Bu durum, 1980 yılında çimento üretiminin %17'sinde kullanılan yüksek fırın cürufunun, 2014 yılına gelindiğinde sadece %8'lik bir oranda kullanılmasına yol açmıştır (Scrivener vd., 2018a). Silis dumanı gibi diğer tamamlayıcı malzemeler de sınırlı rezervleri ve yüksek maliyetleri nedeniyle sürdürülebilir alternatiflerin geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu durum hem çevresel sürdürülebilirlik hem de ekonomik verimlilik açısından çimento endüstrisi için ciddi bir zorluk teşkil etmektedir. Bu katkı maddeleri arasında kireçtaşı ve kalsine kil, sunduğu yüksek klinker ikame seviyesi nedeniyle tercih edilebilir. Ayrıca, Şekil 4'te sunulduğu üzere kil ve kireçtaşı rezervleri de diğer mineral katkılara kıyasla dünya çapında bol miktarda bulunmaktadır (Scrivener vd., 2018a). LC^3 çimentolarının geliştirilmesi ile çimento tesislerinde puzolanik çimento üretiminde ortaya çıkan mineral katkı ihtiyacının geleneksel mineral katkı rezervlerindeki eksiklik sebebiyle karşılanamama problemine çözüm olacağı düşünülmektedir. LC^3 çimentosu, düşük karbon emisyonları sağlayarak çevresel sürdürülebilirliğin artırılmasında önemli bir rol oynamaktadır (Scrivener et al., 2018a).



Şekil 4. Çimento üretiminde yaygın olarak faydalanılan ikame malzemelerinin 2013 rezervleri (Scrivener vd., 2018a**)**

3. Kireçtaşı Kalsine Kil Çimentoları

LC^3, düşük CO_2 emisyonuna sahip yeni nesil bir çimento türüdür. İsviçre Federal Teknoloji Enstitüsü (EPFL) ve Yapı ve Malzeme Araştırma ve Geliştirme Merkezi (CIDEM) tarafından 2010'larda geliştirilmiştir (Scrivener, 2014). LC^3 çimentosu, çevre dostu olması ve geleneksel Portland çimentosuna kıyasla çok daha düşük CO_2 emisyonları sağlaması nedeniyle dikkat çekmektedir (Habert et al., 2020). LC^3'ün araştırmacılar tarafından tercih edilmesinin nedenleri şu şekilde sıralanabilir: i) literatürde ve inşaat endüstrisinde yaygın olarak kullanılan çimento ikame malzemelerine (uçucu kül, yüksek fırın cürufu, silis dumanı vb.) kıyasla kil ve kireçtaşının doğada bulunma rezervlerinin daha fazla olması, ii) daha düşük CO_2 emisyonu sağlayan mineral katkıların kullanım oranının %45'e kadar genişletilmesi, iii) ek bir kaynak arayışı, ulaşım ve tesis masrafı olmadan çimento üretim tesislerinin özkaynakları ile LC^3 üretimi yapabilme kabiliyeti, iv) 7 günlük mekanik özelliklerin sıradan Portland çimento esaslı malzemelerle karşılaştırıldığında tatmin edici sonuçlar elde edilmesi ve v) LC^3 üretimi sırasında maliyet yaratabilecek kil kalsinasyonunun oldukça ucuz ve ulaşılabilir bir malzeme olan kireçtaşı ile telafi edilmesi (Scrivener vd., 2018a). Bu özellikleri sayesinde, LC^3 çimentosu, inşaat sektöründe karbon ayak izini önemli ölçüde azaltma potansiyeline sahiptir.

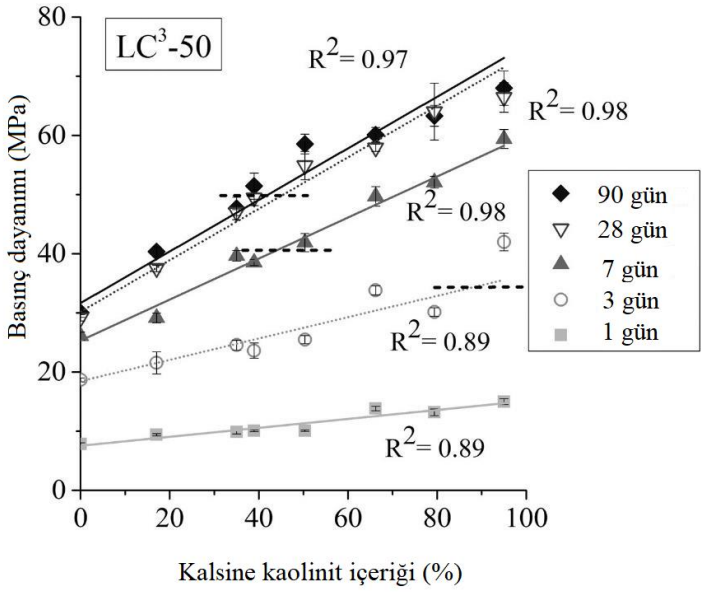
3.1. LC^3'ün Normal Portland Çimentosuyla Karşılaştırmalı Analizi

Ijaz vd.'nin (2023) yaptığı bir çalışmada Kanagaraj vd. (2023) ve Yu vd. (2021) çalışmalarının ürünleri olan LC^3 ve normal Portland çimentosu bazlı betonların maliyet etkinliği, enerji tüketimi, enerji verimliliği ve karbon verimliliği açısından karşılaştırmalı analizi yapılmıştır. Çalışmada normal dayanımlı LC^3 betonları için, çeşitli beton sınıflarının üretim maliyetlerinin normal Portland Çimentosuna kıyasla yaklaşık %5-10 daha düşük olduğu belirtilmiştir. Ayrıca, maliyet etkinliği açısından LC^3'ün %12-16 oranında daha yüksek bir performans sergilediği görülmüş ve bu durum, LC^3'ün ekonomik üstünlüğünü vurgulamaktadır. Bunun yanı sıra, LC^3 betonlarının enerji verimliliğinin %30-80 oranında önemli bir artış gösterdiği kaydedilmiştir. Karbon verimliliği açısından da LC^3 betonlarının, normal Portland çimentolu betonlarına kıyasla %45-90 oranında daha etkili olduğu belirlenmiştir. Çalışmada, bahsedilen bulguların, yapılan diğer çalışmalarla da tutarlı olduğu bildirilmiştir. Pilot uygulamalar (laboratuvar veya küçük düzeyde uygulama), endüstriyel uygulamalar ve en iyi ekipman ve cihazlarla uygulama gibi üç farklı üretim düzeyinde üretilen LC^3 sistemlerinin karbon emisyonlarını ciddi şekilde azalttığına dair kanıtlar mevcut olduğu raporlanmıştır. Çalışmaya göre, LC^3 sisteminin CO_2 emisyonlarını %30 oranında azalttığını gösteren veriler sunulmaktadır (Berriel vd., 2016; Ijaz vd., 2023). Hindistan'da çimento

fabrikaları üzerinde yapılan benzer bir çalışma da benzer sonuçlar raporlanmıştır. Bu çalışma, LC3-50'nin normal Portland çimentosuna kıyasla CO_2 emisyonlarında %30, Portland Pozolanik çimento (uçucu kül) ile karşılaştırıldığında ise %10 civarında bir tasarruf sağladığını göstermektedir. Ayrıca, 50 MPa sınıfı betonlar için yapılan çalışmalar, CO_2 emisyonlarının normal Portland çimentosu ve %30 uçucu kül/%15 öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu içeren harmanlanmış normal Portland çimentosuna kıyasla önemli ölçüde daha düşük olduğunu ortaya koymuştur (Gettu et al., 2019; Scrivener et al., 2018b).

3.2. LC^3 Literatür Araştırması

LC^3 üretiminde kullanılan kilin kalitesi, tipi, üretimde kullanılan bağlayıcıların inceliği, uygulanan kalsinasyon sıcaklığı ve yöntemi gibi parametreler üretilen malzemenin performansına etki etmektedir (Avet ve Scrivener, 2018; Andres vd., 2015; Avet vd., 2016; He vd., 1995; Almenares-Reyes vd., 2022). Avet vd. (2018) yaptıkları bir çalışmada kaolinit içeriğinin harcın basınç dayanımına etkisini araştırmıştır. Şekil 5'te görüldüğü gibi çalışma sonucunda kalsine kaolinit içeriği arttıkça basınç dayanımlarının arttığı sonucuna ulaşılmıştır.



Şekil 5. Harçların basınç dayanımlarının kalsine kaolinit içeriğine göre değişimi (Avet vd., 2016)

Kaolin diğer kil türleri arasında yüksek dayanımlı beton üretiminde ya da puzolanik aktivitesi yüksek çimento üretimlerinde oldukça iyi performans gösterdiği çalışmalarda kanıtlanmıştır (Sabir vd., 2001; Siddique ve Klaus, 2009; Fernández vd., 2011; He vd., 1995). Kullanılan kilin kaolin içeriği LC^3'ün performansını etkileyebilmektedir. Puzolanik aktivitesi en yüksek kalsine kil olan metakaolin çok etkili fakat klinkerden yerine ikame edilecek olan çimentodan daha pahalıdır. Daha düşük saflıkta kaolin içeriğine sahip killer doğada daha yaygın, ulaşılması kolay ve daha ucuz olduğundan çimento üretiminde klinker yerine ikame edildiğinde maliyetleri daha fazla düşürebilir. Bu durum, LC^3'ün özellikle ekonomik açıdan avantajlı olmasını sağlayarak, maliyetlerin düşürülmesine önemli katkılar sağlayabilmektedir. Daha önce de bahsedildiği gibi LC^3 çimentosunun araştırmacılar tarafından birçok avantajı nedeniyle tercih edilmiştir. Bu LC^3 bağlayıcılı hamur ve harç imalatı konusunda uluslararası literatür detaylı bir biçimde araştırılmış olup, söz konusu araştırmalara ilişkin özet bilgiler aşağıda sunulmuştur:

Long vd. (2021) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, tanecik paketleme teorisi ve silis dumanı kullanılarak, 3D baskı için modifiye edilmiş LC^3 kompoziti geliştirilmiştir. Partikül paketleme yoğunluğu ile reolojik özellikler ve kompozitlerin baskı kabiliyeti arasındaki etkileşimler sinerjik bir şekilde incelenmiştir. Buna ek olarak, performans özelliklerinin belirlenmesi amacıyla kum-bağlayıcı (S/B) oranı analiz edilmiştir. Elde edilen bulgular, ağırlıkça %33,33 kalsine kil, %16,67 kireçtaşı tozu ve %5 silis dumanı içeren kompozitlerin, S/B oranının 2,5 olduğu durumda, dinamik ve statik akma gerilmesi ile yapısal iyileşmenin önemli ölçüde iyileştirilebileceğini göstermiştir.

Babafemi vd. (2022), Güney Afrika'daki çeşitli bölgelerden elde edilen üç farklı kaolinitik kili incelemişlerdir. LC^3 harçları, özellikle hidratasyon fazı mineralojisi, mikroyapı, basınç dayanımı ve 3D boşluk yapısı açısından Portland çimentosu ile karşılaştırılmıştır. Araştırma sonuçları, farklı kaolinit içeriklerine sahip kalsine killerden benzer puzolanik oksit ($SiO_2 + Al_2O_3$) elde edilebileceğini ortaya koymuştur. Kaolinit içeriği, harcın puzolanik aktivitesini, işlenebilirliğini ve basınç dayanımını artırırken, mikro ölçekte boşlukların incelmesi kireçtaşı dolgusu ve hidratasyon derecesine bağlı olarak raporlanmıştır. İşlenmiş kaolinitik killerin mineralojik içerikleri, mikroyapıları ve gözenekliliklerinin yeterli düzeyde olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, Portland çimentosunda bulunan kireçtaşı ve alçıtaşının içsel içeriklerinin, sırasıyla %50, %15 ve %5 klinker, kireçtaşı ve alçıtaşı oranları için dikkate alınması gerektiği belirtilmiştir.

Kafodya vd. (2023), %50 ve %40 klinker içerikli LC^3 sistemlerinin dayanım ve fizikokimyasal özelliklerini araştırmışlardır. Hazırlanan çimento harcı numuneleri, su/çimento oranı 0.45, 0.5 ve 0.6 olan ve kalsine kil/kireçtaşı oranları 1:1, 2:1 ve 3:1 şeklinde değişen farklı kombinasyonlardan oluşmuştur. CC/LS oranının taze özellikler, dayanım ve dayanıklılık üzerindeki etkileri incelenmiştir. Sonuçlar, %40 Portland çimentosu ikame seviyesine sahip numunelerin, LC^3-50'den daha yüksek kıvam (%45'e kadar), %8,3-13,3 arasında değişen porozite ve %3,8-10,9 arasında değişen su emme değerlerine sahip olduğunu göstermiştir. LC^3-50 numuneleri ise yaklaşık 40 MPa dayanım elde etmiş, bu dayanımın betonarme yapı elemanları için yeterli olduğu belirlenmiştir. Öte yandan, LC^3-40 numunelerinin yığma yapılar için uygun dayanım özellikleri sunduğu bildirilmiştir.

Haldar vd. (2017), kaolinit içeriğinin çimento karışımlarının özellikleri üzerindeki etkisini incelemiştir. Kaolinit içeriği aralıkları %20-85 arasında belirlenmiş ve bu oranlar üzerinden numuneler hazırlanmıştır. Numuneler, klinker, kireçtaşı ve alçıtaşı kaliteleri sabit tutularak üretilmiştir. Kalsine killerin ve LC^3 karışımlarının izotermal reaktivitesi ve basınç dayanımı test edilmiştir. Sonuçlar, kalsine kilin reaktivitesinin ve LC^3 harcının basınç dayanımının kalsine kilin reaktivitesine paralel olarak neredeyse doğrusal bir şekilde değiştiğini göstermiştir. Bununla birlikte, kaolinit içeriği ile bu özellikler arasında kesin bir ilişki kurulamadığı ifade edilmiştir. Çalışma, kalsine kilin LC^3 sistemlerindeki performansının yalnızca kaolinit içeriğine değil, aynı zamanda kimyasal bileşim, mineralojik fazların varlığı ve kilin jeolojik özelliklerine de bağlı olduğunu vurgulamaktadır.

Shi vd. (2019), 91 gün kür süresi sonunda 5 ve 20 °C'de 0.11 M Na2SO4 çözeltisine maruz kalan harçlarda, kalsine kil (CC), kireçtaşı (L) ve Portland çimentolarının sülfat direncini araştırmışlardır. Metakaolin veya kalsine montmorillonit ile kireçtaşının klinker yerine %35 oranında ikame edildiği harçların puzolanik aktivitesi, basınç dayanımı, gözenek yapısı ve sülfat direnci değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, $CC/(CC + L) \geq 0.5$ olan harçların mükemmel sülfat direnci gösterdiğini ortaya koymuştur. Kalsine killerin puzolanik reaksiyonları sayesinde portlanditin tüketilmesi ve Portland klinkerinin seyreltilmesinin, harçların sülfat direncinin artmasında etkili olduğu rapor edilmiştir.

Qian vd. (Qian vd., 2023), kireçtaşını kısmi kalsinasyon işlemine tabi tutarak içte yoğun kalsiyum karbonat, dışta gevşek kalsiyum oksit yapısı oluşturan bir çekirdek-kabuk yapı elde etmişlerdir. Bu yöntemle geliştirilen çimento esaslı malzemede, ikame seviyesi %80'e kadar olan kalsine kil ve kısmen kalsine edilmiş kireçtaşı kullanılmıştır. Kısmen kalsine kireçtaşı, kalsine kilin reaksiyonunu hızlandırmakta ve çimento malzemelerinin dayanımını artırmaktadır. Araştırma,

7 ve 28 günlük dayanım ölçümlerinde, kireçtaşı-kalsine kil kombinasyonunun sırasıyla %90 ve %137 daha yüksek sonuçlar verdiğini göstermiştir.

Boakye vd. (2024), saf metakaolin yerine düşük dereceli kil kullanımının LC^3 üretimindeki potansiyelini araştırmışlardır. CEM I, ağırlıkça %20, %30, %40 ve %50 oranında kalsine kil ve kireçtaşı ile kısmen ikame edilmiştir. Tüm karışımlar için su-bağlayıcı oranı 0.48 olarak belirlenmiş ve kalsine kil ile kireçtaşı oranı 2:1 olacak şekilde ayarlanmıştır. Hidratasyon sürecinin incelenmesi için XRD, TGA ve izotermal kalorimetri teknikleri kullanılmıştır. LC^3 harç numunelerinin dayanım testleri sonucunda, 28 gün içinde kontrol numunelerini %1,2 ila %18, 91 gün içinde ise %1,6 ila %5,5 oranlarında geride bıraktığı raporlanmıştır. Çalışmada, optimum ikame oranı %20 olarak belirlenmiştir.

Krishnan vd. (2019), kalsine kil, kalker ve alçıtaşının LC^3 sistemlerinde hidratasyon mekanizmaları ve faz gelişimi üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Kalsine kil ve kireçtaşının bireysel etkilerini izole edebilmek için kırılmış kuvars kullanılmıştır. XRD, izotermal kalorimetri, SEM ve MIP teknikleri ile yapılan testler sonucunda, kalsine kilin LC^3'te mikroyapı oluşumunu olumlu yönde etkilediği ve 7 gün içinde olgunlaşmış bir yapı elde edilmesine yardımcı olduğu tespit edilmiştir. Alçıtaşı miktarının artmasıyla birlikte etrenjit oluşumunun da arttığı belirlenmiştir; ancak alçıtaşının artışı, kireçtaşının reaktivitesini azaltıcı etkiye sahip olduğu raporlanmıştır.

4. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada, çimento üretim süreçleri üzerindeki çevresel etkiler, yüksek karbon emisyonu nedeniyle tartışılmaktadır ve LC^3 tipi düşük karbon emisyonlu bağlayıcıların kullanımının önemi vurgulanmaktadır. Çalışmada kapsamında literatür incelendiğinde erişilen sonuçlar aşağıda belirtilmiştir.

- LC^3 tipi çimentolar, kalsinasyon sıcaklıklarının düşürülmesi ve doğal malzemelerin kullanılması ile üretilmektedir, böylece çimento üretim kapasiteleri aynı kalırken, enerji tüketimi ve CO_2 emisyonlarının azaltılmasını sağlamaktadır. Ek olarak LC^3 çimentolarının hem ekonomik hem de çevresel açıdan sürdürülebilir çözümler sunduğu belirtilmiştir. LC^3 üretiminde kullanılan düşük kaliteli killer ve kireçtaşı gibi yerel malzemeler, doğal kaynakların korunmasına ve maliyetlerin düşürülmesine katkı sağlamaktadır. Bu çimentoların inşaat sektöründe daha yaygın kullanımı, doğal kaynakların daha verimli kullanılmasını sağlayarak, çevresel bozulmayı önlemeye yardımcı olabilir.

- Çalışmada ele alınan literatür LC^3 çimentosunun üretim süreçleri, kullanılan hammaddelerin kalitesi, kalsine kilin türü ve kullanılan teknolojiler, üretilen malzemenin performansını doğrudan etkilemekte olduğunu göstermektedir. Özellikle kaolinit içeriği yüksek killerin, LC^3 çimentolarının dayanım ve işlenebilirlik gibi özelliklerini iyileştirdiği ortaya konmuştur.
- Yapılan çalışmalarda LC^3 bağlayıcılı betonların normal Portland çimentolu betonlara göre maliyet, enerji tüketimi ve verimliliği, CO_2 emisyonu gibi parametreler açısından daha etkili ve uygulanabilir olduğu ortaya konmuştur.

Gelecekteki araştırmalar açısından, LC3 çimentosunun daha geniş bir kitle tarafından kabul edilebilir hale getirilmesi büyük önem taşımaktadır. Geleneksel çimento üretim yöntemlerine kıyasla, LC3'ün mimarlar, mühendisler, üreticiler, kullanıcılar ve genel kamuoyu nezdinde benimsenmesi kritik bir rol oynamaktadır. Bu sürecin hızlanması için LC3'ün çevresel avantajlarının daha geniş kitlelere tanıtılması ve uygulanabilirliğinin gösterilmesi gerekmektedir. Buna ek olarak, LC^3'ün uzun dönem durabilite özellikleri üzerine daha fazla çalışma yapılması gereklidir. Özellikle çeşitli iklim ve çevresel koşullara dayanıklılığı, kimyasal saldırılara karşı direnç kapasitesi, su emme ve donma-çözülme çevrimlerindeki performansının derinlemesine araştırılması, LC^3'ün güvenilirliğini ve kullanım süresini daha net bir şekilde ortaya koyacaktır. Ayrıca, LC^3'ün yaşam döngüsü analizine daha fazla odaklanılması gerekmektedir. Bu bağlamda, LC3'ün büyük ve küçük ölçekli üretim yöntemlerinde CO_2 emisyonları, maliyet ve enerji verimliliği açısından sunduğu avantajların kapsamlı bir şekilde incelenmesi, sürdürülebilir inşaat uygulamalarına katkı sağlayacaktır. LC^3'ün karbon ayak izi üzerindeki etkilerinin sadece üretim aşamasında değil, aynı zamanda kullanım ömrü boyunca değerlendirilmesi, daha geniş bir perspektif sunacaktır. Bu süreçte maliyet etkinliği ve enerji verimliliği konularında yapılacak kapsamlı araştırmalar, LC^3'ün küresel olarak daha fazla benimsenmesine katkı sağlayacaktır.

Sonuç olarak, LC^3 çimentosunun sürdürülebilir bir inşaat malzemesi olarak küresel çapta kabul görmesi için bu araştırma alanlarında daha fazla çalışma yapılması hem çevresel hem de ekonomik anlamda önemli katkılar sağlayacaktır.

Kaynakça

United Nations Environment Programme (UNEP). (2019). Global status report for buildings and construction. United Nations Environment Programme.

International Energy Agency (IEA). (2009). Cement technology roadmap: Carbon emissions reductions up to 2050. Organisation for Economic Co-operation and Development.

CEMBUREAU. (2021). The European cement association 2020 activity report. The European Cement Association.

Ige, O. E., Von Kallon, D. V., & Desai, D. (2024). Carbon emissions mitigation methods for cement industry using a systems dynamics model. Clean Technologies and Environmental Policy, 26, 579–597. https://doi.org/10.1007/s10098-023-02683-0

Oral, H. V., & Saygin, H. (2019). Simulating the future energy consumption and greenhouse gas emissions of Turkish cement industry up to 2030 in a global context. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 24, 1461–1482. https://doi.org/10.1007/s11027-019-09855-8

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2020). Global warming of 1.5°C: An IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2020/03/SR15_Errata_20200312.pdf (Accessed: September 26, 2024)

Latawiec, R., Woyciechowski, P., & Kowalski, K. J. (2018). Sustainable concrete performance—CO_2-emission. Environments, 5(2), 27. https://doi.org/10.3390/environments5020027

Barcelo, L., Kline, J., Walenta, G., & Gartner, E. (2014). Cement and carbon emissions. Materials and Structures, 47, 1055–1065. https://doi.org/10.1617/s11527-013-0114-5

Miller, S. A., & Moore, F. C. (2020). Climate and health damages from global concrete production. Nature Climate Change, 10(4), 439–443.

CEMBUREAU. (2024). Activity report 2023. The European Cement Association. https://cembureau.eu/media/dnbf4xzc/activity-report-2023-for-web.pdf (Accessed: September 26, 2024)

Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK). (2023). Sera gazı emisyon istatistikleri, 1990-2021. Erişim tarihi: 26 Eylül 2024. https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Sera-Gazi-Emisyon-Istatistikleri-1990-2021-49672&dil=1

Scrivener, K., Martirena, F., Bishnoi, S., & Maity, S. (2018a). Calcined clay limestone cements (LC3). Cement and Concrete Research, 114, 49–56.

Mañosa, J., Calderón, A., Salgado-Pizarro, R., Maldonado-Alameda, A., & Chimenos, J. M. (2024). Research evolution of limestone calcined clay cement (LC3), a promising low-carbon binder–A comprehensive overview. Heliyon.

Scrivener, K. L., John, V. M., & Gartner, E. M. (2018b). Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO2 cement-based materials industry. Cement and Concrete Research, 114, 2–26.

Singh, G. B., & Subramaniam, K. V. (2019). Production and characterization of low-energy Portland composite cement from post-industrial waste. Journal of Cleaner Production, 239, 118024.

Habert, G., Miller, S. A., John, V. M., Provis, J. L., Favier, A., Horvath, A., & Scrivener, K. L. (2020). Environmental impacts and decarbonization strategies in the cement and concrete industries. Nature Reviews Earth & Environment. https://doi.org/10.1038/s43017-020-0093-3

Mehta, P. K. (2007). Sustainability of the concrete industry—critical issues. ACI Strategic Development Committee's "Concrete Summit on Sustainable Development", Washington DC.

Schneider, M. (2019). The cement industry on the way to a low-carbon future. Cement and Concrete Research, 124, 105792. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105792

United States Geological Survey. (2019). Cement mineral commodity summary 2019. https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/cement/mcs-2019-cemen.pdf (Erişim tarihi: 27 Eylül 2024)

Siddique, R., & Khan, M. I. (2011). Supplementary cementing materials. Springer Science & Business Media. https://doi.org/10.1007/978-3-642-17866-7

Skibsted, J., & Snellings, R. (2019). Reactivity of supplementary cementitious materials (SCMs) in cement blends. Cement and Concrete Research, 124, 105799. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105799

Scrivener, K. L. (2014). Options for the future of cement. The Indian Concrete Journal, 88(7), 11–21.

Avet, F., & Scrivener, K. (2018). Investigation of the calcined kaolinite content on the hydration of Limestone Calcined Clay Cement (LC3). Cement and Concrete Research, 107, 124-135. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.02.005

Vizcaino Andres, L. M., Antoni, M. G., Alujas Diaz, A., Martirena Hernandez, J. F., & Scrivener, K. L. (2015). Effect of fineness in clinker-calcined clays-limestone cements. Advances in Cement Research, 27(9), 546-556. https://doi.org/10.1680/adcr.15.00009

Avet, F., Snellings, R., Diaz, A. A., Haha, M. B., & Scrivener, K. (2016). Development of a new rapid, relevant and reliable (R3) test method to evaluate the pozzolanic reactivity of calcined kaolinitic clays. Cement and Concrete Research, 85, 1-11. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.02.015

He, C., Osbaeck, B., & Makovicky, E. (1995). Pozzolanic reactions of six principal clay minerals: Activation, reactivity assessments, and technological effects. Cement and Concrete Research, 25(8), 1691-1702. https://doi.org/10.1016/0008-8846(95)00165-4

Almenares-Reyes, R. S., Alujas-Diaz, A., Scrivener, K., Bernal, S. A., Provis, J. L., Sui, T., Bishnoi, S., & Martirena-Hernández, F. (2022). Clay calcination technology: State-of-the-art review by the RILEM TC 282-CCL. Materials and Structures/Materiaux et Constructions, 55(1). https://doi.org/10.1617/s11527-021-01807-6

Long, W. J., Lin, C., Tao, J. L., Ye, T. H., & Fang, Y. (2021). Printability and particle packing of 3D-printable limestone calcined clay cement composites. Construction and Building Materials, 282. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122646

Babafemi, A. J., Knobel, H., Kolawole, J. T., Oyebanjo, O. M., Bukalo, N. N., Paul, S. C., & Miah, M. J. (2022). Performance of selected South African kaolinitic clays for limestone calcined clay cement. Applied Sciences, 12(21). https://doi.org/10.3390/app122110810

Haldar, P. K., Mithia, S., Mukherjee, K., Dhabarde, N. R., Bansal, E., Phulwari, P., Kumar, A., Kesh, S., & Maity, S. (2017). The effect of kaolinite content of China clay on the reactivity of Limestone Calcined Clay Cement. 2nd International Conference on Calcined Clays for Sustainable Concrete, Havana, Cuba.

Shi, Z. G., Ferreiro, S., Lothenbach, B., Geiker, M. R., Kunther, W., Kaufmann, J., Herfort, D., & Skibsted, J. (2019). Sulfate resistance of calcined clay-limestone-Portland cements. Cement and Concrete Research, 116, 238-251. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.09.016

Qian, X., Ruan, Y. X., Jamil, T., Hu, C. L., Wang, F. Z., Hu, S. G., & Liu, Y. P. (2023). Sustainable cementitious material with ultra-high content partially calcined limestone-calcined clay. Construction and Building Materials, 373. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129908

Boakye, K., Khorami, M., Saidani, M., Ganjian, E., Tyrer, M., & Dunster, A. (2024). Performance of a single source of low-grade clay in a limestone calcined clay cement mortar. Buildings, 14(1). https://doi.org/10.3390/buildings14010023

Krishnan, S., Emmanuel, A. C., & Bishnoi, S. (2019). Hydration and phase assemblage of ternary cements with calcined clay and limestone. Construction and Building Materials, 222, 64-72. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.144

Özerdem, F. (2024). "İklim Krizinin Gölgesi Altında Avrupa Yeşil Mutabakatı ve Türkiye'yi Bekleyen Zorluklar." Akademi Sosyal Bilimler Dergisi 11(31): 51-65.

INDEPENDENT. (2021). Avrupa Yeşil Mutabakatı hedefleri şimdiden sağlandı, Erişim Tarihi: 27 Eylül 2024, https://independent.bogazici.edu.tr/tr/avrupa-yesil-mutabakati-hedefleri-simdiden-saglandi

Kafodya, I., D. Basuroy, J. M. Marangu, G. Kululanga, R. Maddalena and V. I. Novelli (2023). "Mechanical Performance and Physico-Chemical Properties of Limestone Calcined Clay Cement (LC3) in Malawi." Buildings 13(3).

Kanagaraj, B., Anand, N., Samuvel Raj, R., Lubloy, E., (2023). Techno-socio-economic aspects of portland cement, geopolymer, and limestone calcined clay cement (LC3) composite systems: a-state-of-art-review. Constr. Build. Mater. 398, 132484 https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2023.132484.

Yu, J., Mishra, D.K., Hu, C., Leung, C.K.Y., Shah, S.P., (2021). Mechanical, environmental and economic performance of sustainable Grade 45 concrete with ultrahigh-volume limestone-calcined clay (LCC). Resour. Conserv. Recycl. 175, 105846 https://doi. org/10.1016/J.RESCONREC.2021.105846

Berriel, S., Favier, A., Rosa Domínguez, E., Sa´nchez MacHado, I.R., Heierli, U., Scrivener, K., Martirena Herna´ndez, F., Habert, G., (2016). Assessing the environmental and economic potential of limestone calcined clay cement in Cuba. J. Clean. Prod. 124, 361–369. https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2016.02.125.

Ijaz, N., Weimin, Y. E., ur Rehman, Z., Ijaz, Z., & Junaid, M. F. (2023). Global insights into micro-macro mechanisms and environmental implications of limestone calcined clay cement (LC3) for sustainable construction applications. *Science of the Total Environment*, 167794.

Gettu, R., Patel, A., Rathi, V., Prakasan, S., Basavaraj, A.S., Palaniappan, S., Maity, S., (2019). Influence of supplementary cementitious materials on the sustainability parameters of cements and concretes in the Indian context. Mater. Struct./Mater. Constr. 52 (1), 1–11. https://doi.org/10.1617/S11527-019-1321-5/FIGURES/4



Değişen İklim Koşullarında Dünya ve Türkiye'de Su Kaynaklarının Akıbeti

***Olcay Gülçiçek Uysal*[1]**

[1] Dr. Öğr. Üyesi, Mersin Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Mersin, Türkiye. ORCID: 0000-0001-9032-4241

GİRİŞ

Son yıllarda iklim değişikliğinin su kaynakları üzerindeki potansiyel etkilerine Dünya çapında ilginin arttığına tanık olmaktayız. İklim değişikliği çoğu zaman su miktarının yanı sıra kalitesinin de değişmesiyle iç içe geçmekte ve hızla büyüyen su krizini daha da ağırlaştırmaktadır. Son yıllarda, aşırı iklim koşullarının olumsuz etkileri hidrolojik döngüye küresel yağış modellerinde belirgin değişiklikler, artan atmosferik su buharı, buzulların erimesi, seller, toprak erozyonu ve kuraklık gibi etkilerde yansımaktadır. Su kaynakları yönetiminin enerji, sağlık, gıda güvenliği ve çevre dahil olmak üzere çok çeşitli politika sektörleri üzerinde belirgin bir etkisi vardır. Sonuç olarak, uygulayıcıların suya bağımlı çeşitli sektörler için uygun uyum ve azaltım stratejileri tasarlamaları gerekmektedir.

1. İKLİM KRİZİ VE SU

Son yıllarda dünya genelinde iklim krizi, su kaynakları üzerinde ciddi bir etki yaratmaktadır. İklim değişikliğinin neden olduğu sıcaklık artışları, buzulların erimesi ve yağış rejimlerindeki değişimler, su kaynaklarının dağılımını ve erişimini derinden etkilemektedir. Bu durum, suyun temininden kullanımına kadar her aşamada önemli zorluklar doğurmaktadır. Özellikle kuraklık, seller, su stresi gibi fenomenler, hem insan hem de ekosistem sağlığı üzerinde olumsuz sonuçlar doğurmaktadır. Bu bağlamda, iklim krizinin su kaynakları üzerindeki etkileri, küresel düzeyde sürdürülebilir su yönetimi stratejilerinin aciliyetini ortaya koymaktadır (Karaman ve Gökalp, 2010; Abbass ve ark., 2022).

Su ve iklim değişikliği arasındaki ilişki oldukça karmaşıktır. Temelde su döngüsü üzerindeki değişiklikler, iklim değişikliğinin su kaynaklarına etkisini belirler. Artan sıcaklık, buharlaşmayı artırarak su döngüsünü etkiler ve yağış desenlerini değiştirir. Kuraklık, seller, sel ve buzulların erimesi gibi faktörler su kaynaklarına olan etkiyi artırır (Abbass ve ark., 2022).

Su Kaynakları ve Su Döngüsü

Su döngüsü, diğer adıyla hidrolojik döngü, suyun Dünya yüzeyinde ve atmosferde sürekli hareketini tanımlar ve doğal çevrenin en kritik unsurlarından birini temsil etmektedir. Bu döngü, suyun okyanuslardan atmosfere buharlaşması, atmosferde yoğunlaşarak yağış olarak yeryüzüne düşmesi ve tekrar okyanuslara, göllere veya yeraltı sularına geri dönmesi sürecini içerir (USGS,2016). Su döngüsü ve iklim değişikliği arasındaki ilişki, iklim değişikliğinin su kaynakları üzerindeki etkilerini anlamak için önemlidir. Su döngüsünün iklim değişikliği tarafından nasıl etkilendiği, bu etkilerin su kaynaklarının dağılımı, miktarı ve kalitesi üzerinde nasıl bir etkiye sahip olduğu detaylı bir şekilde incelenmelidir. Ayrıca,

su döngüsünün değişen iklim koşulları altında nasıl bir evrime uğradığı ve bu durumun su kaynaklarına olan etkileri üzerine yapılmış çalışmalardan elde edilen bulgulara yer verilmelidir (Sukanya ve Joseph,2023).

Dünyadaki mevcut su kaynaklarının oranlarını incelemek, su kaynaklarının yönetimi ve korunması açısından önemli bir perspektif sunmaktadır. Su, dünyamızın toplam yüzeyinin yaklaşık %71'ini kaplamakla birlikte, bu suyun yalnızca %2,5'u tatlı su olarak mevcuttur. Tatlı suyun büyük bir kısmı buzullarda ve yeraltı suyu akiferlerinde bulunmaktadır. Yeraltı suyu kaynakları, dünya tatlı su kaynaklarının %30'unu oluşturarak önemli bir rol oynamaktadır (Tokuşlu, 2022).

Dünyamızın sıcaklığının artmaya devam etmesi, su kaynakları üzerinde ciddi olumsuz etkiler yaratmaktadır (Water Calculator, 2018). Önümüzdeki yıllarda meydana gelecek değişikliklerin boyutu, küresel sera gazı emisyonlarının miktarına ve gezegenimizin duyarlılığına bağlı olacaktır (NASA, 2024).

Dünyadaki su kaynaklarının durumu tatlı su kullanımı, sosyo-ekonomik gelişme ve beslenme de dahil olmak üzere tüketim kalıplarındaki ilgili değişikliklerin bir araya gelmesiyle yılda %1'in biraz altında artmaktadır. Tarım, kullanılan tatlı suyun kabaca %70'ini oluştururken, endüstriyel (≈%20) ve evsel (≈%10) kullanımlarda artan su talebinin ana itici güçleridir (UN,2024).

Sanayileşme, nüfus artışı, kentleşme su temini ve sanitasyon sistemlerini artırmaktadır. Dünya nüfusunun yaklaşık yarısı halihazırda yılın en azından bir bölümünde şiddetli su kıtlığı yaşamaktadır. Dünya nüfusunun dörtte biri, yıllık yenilenebilir tatlı su kaynaklarının %80'inden fazlasını kullanarak 'aşırı yüksek' düzeyde su stresiyle karşı karşıyadır (IPCC, 2023).

Yeraltı suyu, sulama için kullanılan tüm suyun yaklaşık %25'ini ve evsel amaçlarla çekilen tatlı suyun yarısını sağlamaktadır (UN, 2024).

Su kaynakları durumu Türkiye'de çeşitli faktörlere bağlı olarak belirlenir; bunlar arasında coğrafi yapı, iklim koşulları, su kaynaklarının dağılımı, su kalitesi ve su kullanımı önemli rol oynar. Ülkenin farklı bölgelerinde su kaynakları çeşitlilik gösterir ve sürdürülebilir yönetim stratejileri oluşturulurken bu faktörlerin dikkate alınması gerekmektedir. Ayrıca, nüfus artışı, tarımsal sulama, endüstriyel kullanım ve çevresel etkiler gibi unsurlar da Türkiye'deki su kaynaklarının durumu üzerinde etkili olan önemli faktörler arasında yer almaktadır.

Türkiye, sularla çevrili olmasına rağmen su stresi yaşayan bir ülke olarak bilinir. Ülke, yarı kurak bir bölgede yer almakta olup aşırı sıcaklıklara maruz kalmaktadır. Türkiye'nin su kaynakları doğal göller, akarsular, rezervuarlar ve yeraltı sularıyla sağlanmaktadır. Ülkede 120'den fazla göl bulunmakta olup bunların

en büyüğü Van Gölü'dür. Ayrıca 700'den fazla rezervuar da mevcuttur. Bu rezervuarlar arasında Atatürk, Keban ve Karakaya Barajları en büyükleri olarak öne çıkmaktadır (TC Tarım ve Orman Bakanlığı, 2023).

2022 istatistiklerine göre, toplam su tüketiminin büyük bir kısmı sulama suyu olarak kullanılmakta olup, geri kalanı içme-kullanma ve sanayi suyu ihtiyaçları için harcanmaktadır. Türkiye, Akdeniz iklim kuşağında bulunmakta ve küresel iklim değişikliğinin etkilerini yoğun olarak hissetmektedir. İklim değişikliği nedeniyle, havzalarımızdaki su kaynaklarının gelecekte %25'e varan oranlarda azalabileceği öngörülmektedir. Bu durum, ülkemizin su kaynaklarını etkili bir şekilde yönetme ihtiyacını ortaya koymaktadır. Uluslararası Falkenmark indeksine göre, kişi başına düşen yıllık su miktarı 1.313 m³ olarak belirlenmiş olup, artan nüfusla birlikte bu miktarın 2030'dan sonra 1.000 m³'ün altına düşmesi beklenmektedir. Bu durum, Türkiye'nin yakın gelecekte su kıtlığı ile karşı karşıya kalabileceğini ve bunun sosyal ve ekonomik olarak olumsuz sonuçlar doğurabileceğini göstermektedir (TC.Tarım ve Orman Bakanlığı,2023).

Türkiye'nin su kullanımıyla ilgili veriler şu şekildedir (DSİ, 2021 ve DSİ, 2023 verilerine göre): Yıllık toplam yağış miktarı 450 milyar m³, yüzey akış miktarı 185 milyar m³, kullanılabilir yerüstü suyu miktarı 94 milyar m³, Yeraltı suyu emniyetli rezerv miktarı 18 milyar m³, kullanılabilir su miktarı 112 milyar m³'dür. Sektörel su kullanımları ise toplam 57 milyar m³ olup bunun 44 milyar m³'ü tarımsal sulama, 13 milyar m³'ü ise içme-kullanma ve sanayide kullanılmaktadır.

2.İKLİM DEĞİŞİKLİĞİNİN SU DÖNGÜSÜ VE SU KAYNAKLARI ÜZERİNE ETKİLERİ

2.1. Yağış

Yağış, Dünya'daki yaşamın sürdürülmesinde çok önemli bir rol oynamaktadır. Yağış,hava sıcaklığı, buharlaşma hızı ve atmosferik nem içeriği ile doğru orantılıdır (Boulet ve ark., 2020). Teorik olarak, küresel ısınma nedeniyle atmosferik su buharı içeriğinin yüksek olması, hidrolojik döngünün hızlanmasına/yoğunlaşmasına neden olur. Söz konusu teori, termodinamik Clausius-Clapyeron ilişkisi ile özetlenmiştir; bu ilişki, özgül nemin sıcaklıkla neredeyse üstel olarak artacağını ima etmektedir (Alduchov ve Eskridge, 1996).

Küresel su döngüsünün yoğunlaşması sonuçta iki önemli hidrolojik aşırı olayla sonuçlanır: kuraklık ve taşkınlar (Huntington, 2006). Kuraklık, artan potansiyel buharlaşma-terleme nedeniyle hidrolojik dengeyi bozan uzun süreli anormal kuru hava dönemidir (Wang ve ark., 2018).

2.2. Kriyosferik Su Kaynakları

İklim sisteminin ayrılmaz bir parçası olan kriyosfer, buzulları, buz tabakalarını, okyanus, göl veya nehir buzunu, buz örtüsünü, permafrostu (donmuş topğrak) içerir. Bu hassas su rezervuarları, devam eden iklim değişikliklerine hızla yanıt vermektedir (WMO, 2021).

Küresel ısınmanın kriyosferik su kaynakları üzerindeki etkileri dünya çapında belgelenmiştir (Wu ve ark., 2015; Taloor ve ark., 2021; Hock ve Huss, 2021). Sonuç olarak, kriyosferik nehir havzalarında artan akış ve deşarj zirveleri gözlemlenmektedir (Wu ve ark., 2015; Escanilla-Minchel ve ark., 2020).

Kriyosfer, gezegenin donmuş bölgelerini ifade eden terim olarak kullanılır ve dünya üzerindeki tatlı suyun yaklaşık %69'unu içinde barındırır. İklimin düzenlenmesi açısından kritik öneme sahip olan kriyosfer ve okyanuslar, iklim değişikliğinin etkilerine son derece hassas tepki verirler. Okyanuslar ve kriyosferdeki değişimlerin hızlanması, iklim krizinin en belirgin ve etkili belirtilerinden biridir. Her iki ekosistem de iklim sistemi istikrar kazansa da, değişmeye devam edecek ve iklim değişikliğinin neden olduğu zararın toplumsal etkileri geri dönülemez düzeyde olabilir (Golledge et al., 2015). Ancak sera gazı emisyonlarının anında azaltılması, oluşacak zararın sınırlı kalmasını sağlayabilir; bu da uyum çabalarını daha kolay ve etkin hale getirebilir.

2.3. Yüzey Suyu Kaynakları

Yüzey suyu kaynakları, sıcaklık, yağış, buharlaşma ve terleme gibi iklim değişkenlerindeki değişikliklerin bir sonucu olarak önemli değişikliklere maruz kalmaktadır. Bu değişiklikler yüzey akışını ve su mevcudiyetini etkilediğinden nehirlerin deşarj rejimini de etkilemektedir (Jahandideh-Tehrani ve ark., 2019). Hidrolojik döngünün ayrılmaz bileşenlerinden biri olan akış, değişen iklime karşı oldukça hassastır ve bu durum gelecekte daha da önemli hale gelebilir. Çeşitli çalışmalar, iklim değişikliğinin dünya çapındaki çeşitli nehirlerin gelecekteki akışları üzerindeki olası hidrolojik etkilerini göstermiştir (Jahandideh-Tehrani ve ark., 2019).

Her ne kadar dünyanın bazı bölgelerinde, örneğin Etiyopya'da (Fentaw vd., 2018) akarsu akışında artış olacağı tahmin edilse de; Endonezya (Santikayasa ve ark., 2015), Pakistan (Hassan ve ark., 2019), Avustralya tropikleri (Usman ve ark., 2021), Kuzeybatı Yunanistan (López- Ballesteros ve ark., 2020), Nepal (Maharjan ve ark., 2021), Qinghai-Tibet Platosu (Tian ve ark., 2020), gibi farklı iklim uç noktalarına göre yağış ve buharlaşma talebi gibi değişkenlerin yüzey suyu miktarı üzerindeki etkilerinin sıklıkla farklılık gösterdiğini belirtmiştir.

Yağıştaki değişimler nehir akış rejimlerini kesintiye uğratabilir ve sonuç olarak kirleticilerin seyrelmesini ve hareketliliğini etkileyebilir (Rehana ve Mujumdar, 2011). Yüzey suyu kalitesinin bozulmasına neden olan bir diğer olası faktör, kimyasal reaksiyon kinetiğinin değişmesi nedeniyle sıcaklığın artmasıdır. Çok sayıda araştırmacı iklim değişikliği karşısında yüzey suyu kalitesini tartışmıştır (Rehana ve Mujumdar, 2011; Vanderhoof ve ark., 2018).

2.4. Yeraltı Suyu Kaynakları

İklim değişkenlerinin yeraltı suyu ile etkileşimini anlamak, yüzey suyu ile olan etkileşimden daha karmaşıktır (Lipczynska-Kochany, 2018). İklim değişikliği, yeraltı suyu sistemlerini hem miktar hem de kalite açısından etkiler. Miktar açısından, iklim zorlaması toprak infiltrasyon ve perkolasyon oranlarını ve dolayısıyla yeraltı suyu beslenmesini etkileyebilir. Ayrıca, yükselen sıcaklıklar bir bölgedeki buharlaşma talebini artırarak yeraltı suyunun yenilenme oranını daha da kısıtlar. Doymamış bir akifer sisteminde, vadose zonu, on yıllardan bin yıllara kadar iklim değişikliği hakkında önemli bilgiler sağlar. Çeşitli çözelti (örneğin, klorür) bazlı (Manna ve ark., 2019; Lu ve ark., 2020) ve izotop (örneğin, δ18O, δD, 3H, 14C) izleyici çalışmaları bu bilgiyi çıkarmada başarıyla uygulanmıştır (Abiye ve Leketa, 2021). İklim değişikliği, hidrolojik süreçlerdeki değişiklikler sonucunda yeraltı suyu kalitesini tehdit eder (Kløve ve ark., 2014). Ayrıca, artan sıcaklıklar yeraltı suyunun biyolojik, kimyasal ve fiziksel özelliklerini değiştirerek kalitesini etkiler (Hähnlein ve ark., 2013). Yeraltı suyu beslenmesinin zamanlaması ve büyüklüğündeki değişiklikler, yeraltı suyu seviyelerindeki dalgalanmalar, küresel ısınmanın diğer olumsuz etkileridir. Bu yeraltı suyu seviyelerindeki dalgalanmalar, bölgedeki yüzey suyu-yeraltı suyu bağlantısını da etkiler (Scibek ve ark., 2007).

3.TÜRKİYE SU KAYNAKLARI ÜZERİNE ETKİLERİ

Yapılan bilimsel çalışmalarda iklim değişikliğinin Türkiye'deki su kaynakları üzerinde önemli etkiler yaratacağı öngörülmektedir. İklim modelleri ve hidrolojik simülasyonların kullanıldığı çalışmalar, ülke genelinde tatlı su akışında ve yağmur suyu depolamasında potansiyel azalmaların olduğunu göstermektedir (Ertürk ve ark., 2023). Bu değişikliklerin tarım, sanayi ve evsel su kullanımı dahil olmak üzere çeşitli sektörleri etkilemesi kaçınılmazdır (Kılıç, 2020). Türkiye'deki nehir havzaları özellikle hassastır; bazı bölgeler artan kuraklık ve su kıtlığı riskleriyle karşı karşıyadır (Tokuşlu, 2022). RCP8.5 senaryosu kapsamında 2071-2100 yılına kadar yılda 57,3 km3'e varan potansiyel su açığını öngören tahminlerle tarımsal üretimin ciddi şekilde etkilenmesi muhtemeldir (Pilevneli ve ark., 2022). Ege Bölgesi'nde üretim ve gelirde ciddi düşüşler yaşanabilir; herhangi bir

önlem alınmazsa iklim değişikliğinin tahmini yıllık maliyeti 14,15 ile 18,01 milyar Euro arasında değişebilir (T. Pilevneli ve ark., 2022). Bu bulgular, Türkiye'de uyarlanabilir önlemlere ve geliştirilmiş su yönetimi stratejilerine olan acil ihtiyacın altını çizmektedir.

2023-2033 yılları arasında Türkiye su kaynakları üzerine hazırlanan Su Verimliliği Strateji Belgesi ve Eylem Planı'nında İklim değişikliğinin su kaynakları üzerine etkileri ve gelecek senaryoları belirlenmiştir. Bu planda yapılan çalışmalara göre ise, Türkiye'nin iklim değişikliğinden en fazla etkilenecek olan Akdeniz kuşağında olmasından dolayı yüksek risk grubu ülkeler arasında olduğu ortaya konmuştur. Türkiye'de 21. yüzyılda, değişen iklim koşulları sebebiyle daha sık, şiddetli ve uzun süreli kuraklıklar, sıcak hava dalgaları ve orman yangınlarının görülmesi beklenmektedir. Ayrıca, kısa süreli fakat yoğun sağanak yağışların artmasıyla ani taşkınların da önemli ölçüde artacağı öngörülmektedir (TC.Tarım ve Orman Bakanlığı,2023).

Sıcaklık artışlarına neden olan küresel iklim değişikliğinin, su kaynakları, tarımsal üretim, sağlık, ormancılık, biyolojik çeşitlilik ve turizm sektörleri üzerine etkisi kaçınılmazdır. İklim değişikliği, hidrolojik döngüyü ve sistemleri değiştirerek su kaynaklarının miktarını ve kalitesini olumsuz yönde etkileyecektir. Özellikle su çevrimi üzerindeki bu değişiklikler, su kaynaklarının kullanılabilirliği, miktarı ve kalitesinde önemli değişikliklere yol açacaktır. (TC.Tarım ve Orman Bakanlığı,2023)..

İklim değişikliğinin su kaynakları üzerine etkilerinin belirlenmesi adına ülkemizin 25 havzası üzerindeki etkilerine dair 2100 yılına kadar yapılan projeksiyonlarının bulguları ortaya koymaktadır ki, doğu ve güneydoğu bölgelerinde ortalama sıcaklık artışının 1-2°C artışı; yaz aylarında güney ve batı bölgelerinde belirgin sıcaklık artışı; Ege, Akdeniz kıyıları, Güneydoğu ve Doğu bölgelerinde genel olarak yağışların azalacağı, özellikle kış aylarında azalmaların daha belirgin olacağı belirtilmektedir. Ardışık kurak günlerinin doğu Akdeniz, Konya kapalı havzası ve Fırat-Dicle Havzasının bazı bölgelerinde artacağı, bazı bölgelerde uzun süreli kuraklık yaşanacağı, toplam kar örtüsünde azalmalar yaşanacağı ve bunun su stresini artırabileceği vurgulanmaktadır.

Türkiye için yapılan çalışmalar, 2013-2019 dönemi tarımsal üretim verileri ile iklim değişikliğinin su kaynakları üzerindeki etkilerini değerlendirmiştir. Bu çalışmalar sonucunda, ülkemizde halihazırda 14,6 km³/yıl su fazlası bulunduğu tespit edilmiştir. Ancak, RCP 8.5 senaryosuna göre 2071-2100 döneminde bu fazla suyun yerini 57,3 km³/yıl su açığı alması beklenmektedir. Ayrıca, 2015-2040 dö-

neminde RCP 4.5 senaryosuna göre 15 nehir havzasında su açığı riski bulunurken, bu riskin 2041-2100 döneminde RCP 8.5 senaryosuna göre 18 havzada geçerli olacağı öngörülmektedir. Su ayak izi metodolojisi kullanılarak yapılan su bütçesi hesaplamaları ise İklim Değişikliğinin Su Kaynaklarına Etkisi Projesi sonuçlarıyla karşılaştırıldığında daha fazla havzada su açığı riski ortaya koymuştur. Bu durum, su talebinin karşılanamayabileceğini ve tarımsal verimlilik önlemlerinin acilen hayata geçirilmesi gerektiğini göstermektedir (Pilevneli vd., 2023).

4.SU KALİTESİNDEKİ DEĞİŞİMLER

Su kaynaklarındaki iklim krizinin etkisiyle su kalitesinde ciddi değişimler yaşanmaktadır ve bunun sonuçları giderek daha belirgin hale gelmektedir. Artan sıcaklıklar ve yağış rejimindeki önemli değişiklikler, su kaynaklarının kirlenmesine ve tuzlanmasına yol açmakta, bu durum da ekosistem dengelerini ciddi bir şekilde bozarak suyun sağladığı hizmetlerin kaliteli bir şekilde sürdürülebilirliğini tehdit etmektedir. Özellikle kuraklık ve seller gibi aşırı hava olayları, su kalitesini olumsuz bir şekilde etkilemekte ve bu olağandışı koşullar, suyun kimyasal ve fiziksel özelliklerini belirgin şekilde değiştirmekte ve insan sağlığı üzerindeki olumsuz etkilerinin artmasına neden olmaktadır.

İklim değişikliğinin su kaynaklarının varlığına etkisinin yanında kalitesinde de değişimlere sebep olmaktadır. Su kaynaklarının kalitesi üzerine etkileri fiziko-kimyasal parametreler (sıcaklık, pH, çözünmüş oksijen, çözünmüş organik madde ve besin maddeleri), mikro kirleticiler (pestisitler, farmakolojik ürünler gibi inorganik veya organik parametreler) ve biyolojik parametrelerle (patojen mikroorganizmalar, siyanobakteriler ve balıklar, yeşil algler, diyatomlar) ortaya konulabilir. Suyun kalitesinin yorumlanmasında kullanılan bu parametrelerin etkisi ise su kaynaklarının tipine ve göre değişmektedir Sıcaklığın her 3 derecelik artışı, suyun kalitesinde direkt etkili olan oksijenin azalmasına neden olmaktadır. Suyun miktarındaki azalma ise, çözünmüş madde yoğunluğunun artışına neden olmaktadır. (Delpla ve ark., 2009; Çapar, 2019).

5. ALINACAK TEDBİRLER

Su kaynakları üzerindeki baskıların azaltılması, mevcut büyüme hızı, değişen su tüketim alışkanlıkları ve artan su talebi karşısında su kaynaklarının sürdürülebilir bir şekilde yönetilmesi, iklim değişikliğinin su kaynakları üzerindeki olumsuz etkilerine uyum sağlanması gibi konular, günümüzün en önemli küresel sorunları arasında yer almaktadır. Bu bağlamda, su kaynaklarının korunması ve gelecek nesillere aktarılması, sürdürülebilir kalkınma hedefleri doğrultusunda kritik bir öneme sahiptir.

İklim krizinde su kaynaklarını korumak için alınabilecek bazı tedbirler şunlar olabilir:

a. Su tasarrufu ve verimliliği sağlayan önlemler

Su tasarrufu ve verimliliği, su kaynaklarının sürdürülebilirliği açısından son derece kritik bir öneme sahiptir. Su tasarrufu yaparak su kullanımını azaltmak, yalnızca bireyler açısından değil, aynı zamanda toplumun genelinde kaynakların korunmasına katkıda bulunarak, geleceğimiz için çok daha sağlıklı bir çevre yaratılmasına da büyük katkılar sağlar. Bu bağlamda, su verimliliği, mevcut su kaynaklarının daha etkin ve bilinçli bir şekilde kullanılmasını mümkün kılarak, herkesin bu önemli konuda üzerine düşen sorumluluğu yerine getirmesine olanak tanır. Bu önemli amaçlar doğrultusunda, evsel su tasarrufu için su kullanım alışkanlıklarını gözden geçirmek ve suyu israf etmeden, uzun vadeli ve verimli bir şekilde kullanmak gereklidir Evlerde, iş yerlerinde ve tarım alanlarında suyun daha verimli kullanılması için teknolojik yenilikler ve su tasarrufu sağlayan cihazlar kullanılabilir. Duş başlıkları, musluklar, sifonlar gibi su tüketimini azaltan ürünler tercih edilebilir.

b. Tarımsal Su Kullanımında Verimlilik

Tarımsal alanda su verimliliğinin artırılması için modern sulama tekniklerinin etkin bir şekilde ve dikkatlice kullanılmasına ihtiyaç vardır. Damlama sulama ve yağmurlama sulama gibi, suyun doğrudan bitkilere ulaşmasını sağlayan gelişmiş ve ileri düzeydeki yöntemler tercih edilmelidir. Bu sayede, bitkilerin ihtiyaç duyduğu su miktarı eksiksiz bir şekilde karşılanmış olacaktır. Ayrıca, toprak verimliliğinin artırılması ve suyun etkin bir şekilde kullanılabilmesi amacıyla tarımsal uygulamalarda bilinçli su yönetimi sistemlerinin benimsenmesi ve teknolojik yeniliklerin geniş bir şekilde yaygınlaştırılması son derece önem taşıyan bir meseledir. Bu yaklaşım, hem ürün kalitesini ve çeşidini yükseltecek hem de çevresel sürdürülebilirliği destekleyecek önemli katkılarda bulunacaktır. Uzun vadede, bu tür uygulamalar, tarımsal üretimin artırılmasının yanı sıra, su kaynaklarının daha verimli kullanılmasını sağlayarak doğal kaynakların korunmasına da yardımcı olacaktır.

c. Su kirliliğinin önlenmesi , Su Arıtma Teknolojileri ve Yenilikler geliştirmek

Su arıtma teknolojileri, su kaynaklarının geleceği açısından kritik bir öneme sahip olan alanlardır. Bu teknolojiler, su kaynaklarının kirletici maddelerden etkili bir şekilde arındırılmasını sağlamakta ve temiz suyun halkın kullanımına sunulmasını kolaylaştırmaktadır. Su arıtma sistemleri sadece bireylerin değil, aynı

zamanda tüm ekosistemlerin sağlığı için de hayati öneme sahiptir. Aynı zamanda, su arıtma teknolojileri, su kaynaklarının sürdürülebilir bir şekilde kullanılması ve korunması açısından da büyük bir önem taşımaktadır. Bu nedenle, su arıtma teknolojileri sürekli olarak geliştirilmekte ve yenilikçi çözümler üretilmektedir. Böylece, suyun daha etkili bir şekilde arıtılması ve yönetilmesi hedeflenmektedir. Gerçekleştirilen bilimsel çalışmalar ve teknik gelişmeler, bu alandaki verimliliği artırmaya yönelik çalışmaların temelini oluşturmaktadır. Endüstriyel atıkların ve tarımsal kimyasalların su kaynaklarına sızmasını önlemek için sıkı düzenlemeler ve denetimler getirilmelidir. Arıtma sistemleri iyileştirilmeli ve su kalitesi düzenli olarak kontrol edilmelidir. Yağmur suyu toplama sistemleri ve gri su geri kazanım sistemleri gibi altyapılar geliştirilerek, kullanılmış suyun tekrar kullanılması teşvik edilmelidir.

d. Bilinçlendirme ve eğitim: Halkın ve işletmelerin su tasarrufu ve su kaynaklarının korunması konusunda bilinçlendirilmesi çok önemlidir. Eğitim kampanyaları düzenlenmeli ve suyun önemi vurgulanmalıdır.

e. İklim Değişikliğine Uyum ve Dayanıklılık

İklim değişikliğine uyum ve dayanıklılık stratejilerinin önemi, özellikle su kaynaklarının güvence altına alınması açısından oldukça büyük bir anlam taşımaktadır. Bu stratejilerin uygulamaları arasında su kaynaklarının yönetiminde esneklik ve adaptasyon sağlamak başrollerde yer almaktadır ve bu durum, doğal afetlerin sıklığının artış göstermesiyle birlikte vazgeçilmez bir gereklilik haline dönüşmüştür. Özellikle su kıtlığına karşı etkili ve dayanıklı bir altyapının oluşturulması yanında, kapsamlı ve etkili politikaların geliştirilmesi büyük bir önem arz etmektedir. Ayrıca, su kaynaklarının sürdürülebilir ve uzun vadeli bir şekilde yönetilmesi, iklim değişikliğine karşı direnç sağlamak adına son derece elzemdir. Bunun yanı sıra, suyun daha etkin ve verimli bir biçimde kullanılmasını teşvik eden kapsamlı politikaların geliştirilmesi de aklımızda tutmamız gereken bir konu olmalıdır. Tüm bu unsurlar, iklim değişikliğinin olumsuz etkilerini asgariye indirmek ve su kaynaklarımızı korumak için atılacak adımlar arasında kesinlikle yer almalıdır. Bu süreçte, bireylerin ve toplulukların aktif katılımı, farkındalık artırma çalışmaları ile eğitim programlarının hayata geçirilmesi büyük bir önem taşımaktadır. Bilinçli bireyler olarak, su kaynaklarının korunması ve iklim değişikliği karşısında direncin artırılması için gerekli adımları atmaya teşvik edilmeliyiz. Bu sayede, bireysel ve toplumsal dayanıklılığımızı artırarak, gelecek nesillere daha sağlıklı ve yaşanabilir bir dünya bırakma amacına ulaşabiliriz.

Bu tedbirler, su kaynaklarının iklim krizine karşı dayanıklılığını artırmaya yönelik olup, hem bugünün hem de gelecek nesillerin su ihtiyaçlarını karşılamak için kritik öneme sahiptir.

6. ULUSLARARASI VE ULUSAL SU POLITIKALARI

Su kaynaklarının korunması ve yönetilmesi, her zaman global düzeyde tartışılan önemli bir konu olmuştur. İklim değişikliğinin su kaynakları üzerindeki etkilerini ve bu konuda alınabilecek tedbirleri ele alan ulusal ve uluslararası düzeyde birçok antlaşma, direktif ve politika bulunmaktadır. Bunlardan Bazıları;

1. Paris İklim Anlaşması (2015): İklim değişikliği ile mücadele için uluslararası bir çerçeve sunar. Su kaynaklarının korunması ve sürdürülebilir yönetimi için hükümetler arası iş birliğini teşvik eder.

2. Birleşmiş Milletler Çevre Programı (UNEP): İklim değişikliği ile ilgili olarak su kaynaklarının sürdürülebilir kullanımı ve korunması konularında rehberlik sağlar.

3. Birleşmiş Milletler Su Anlaşması (1997): Su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimi ve paylaşımı konusunda devletler arası anlaşmaları teşvik eder.

6.1. Avrupa Birliği Direktifleri ve Politikaları

1. Su Çerçeve Direktifi (2000/60/EC): Avrupa Birliği'nin su kaynaklarının korunması, iyileştirilmesi ve sürdürülebilir yönetimi için temel bir mevzuatıdır.

2. İklim Değişikliği Stratejisi (EU Climate Action): Su kaynaklarının iklim değişikliği ile etkileşimini ele alarak sürdürülebilir yönetim politikalarını teşvik eder.

6.2. Ulusal Düzeyde Politikalar ve Tedbirler

6.2.1. Strateji ve Eylem Planları

2024-2030 İklim Değişikliği Azaltım ve Uyum Strateji ve Eylem Planları: Bu planlar, su kaynaklarının korunması ve iklim değişikliğine uyum sağlanması için çeşitli stratejiler ve eylemler içermektedir.

2053 Net Sıfır Emisyon Hedefi: Türkiye, 2053 yılına kadar net sıfır emisyon hedefine ulaşmayı planlamaktadır1.

6.2.2. Su Yönetimi ve Altyapı Yatırımları

Entegre Su Yönetimi: Su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimi için entegre su yönetimi yaklaşımları benimsenmektedir2.

Atık Su Arıtma: Atık suların arıtılarak yeniden kullanılması, su kaynaklarının korunmasına yardımcı olmaktadır2.

6.2.3. Tarım ve Gıda Güvenliği

Verimli Sulama Teknikleri: Damla sulama gibi verimli sulama teknikleri kullanılarak su kaybı azaltılmaktadır2.

Sürdürülebilir Tarım Uygulamaları: Tarımda su tasarrufu ve sürdürülebilir uygulamalar teşvik edilmektedir.

6.2.4. Eğitim ve Farkındalık

Toplum Bilinçlendirme: Su tasarrufu ve su kaynaklarının korunması konusunda toplumun bilinçlendirilmesi için kampanyalar düzenlenmektedir2.

Eğitim Programları: Okullarda ve topluluklarda su kaynaklarının korunması konusunda eğitim programları uygulanmaktadır2.

Bu antlaşma, direktif ve politikalar, iklim değişikliğinin su kaynakları üzerindeki etkilerini azaltmayı ve sürdürülebilir su yönetimi için stratejiler geliştirmeyi amaçlamaktadır. Her biri farklı bir perspektiften yaklaşsa da genel olarak su kaynaklarının korunması ve sürdürülebilir yönetimi üzerine odaklanırlar. Uluslararası ve ulusal su politikaları, su kaynaklarının yönetimi ve korunmasında kritik bir rol oynamaktadır; bu politikalar, iklim değişikliğinin etkileriyle başa çıkmak ve su krizini önlemek adına stratejik yaklaşımlar geliştirmeyi amaçlamaktadır.

Türkiye'nin İklim Değişikliği Uyum Stratejisi ve Eylem Planı, ülkenin iklim değişikliği ile mücadele ve uyum sağlama çabalarını içeren kapsamlı bir belgedir. Su kaynakları yönetimi, stratejinin önemli bir bileşenidir ve aşağıdaki ana noktalarda özetlenebilir:

1. Su Kaynakları Değerlendirmesi ve Yönetimi: İklim değişikliği Türkiye'deki su kaynaklarını doğrudan etkilemektedir. Artan sıcaklıklar, yağış rejimindeki değişiklikler ve su talebindeki artışlar su kaynaklarının yönetimini zorlaştırmaktadır. Strateji, mevcut su kaynaklarının değerlendirilmesi, su kalitesinin korunması ve suyun verimli kullanımını teşvik etmeyi hedeflemektedir.
2. Su Kaynaklarının Korunması ve Restorasyonu: Erozyon, kuraklık ve diğer iklim değişikliği etkilerine karşı su kaynaklarının korunması büyük önem taşımaktadır. Plan, sulak alanların restorasyonunu ve ekosistem tabanlı su kaynakları yönetimini teşvik etmektedir.

3. Su Verimliliği ve Tasarrufu: Su kullanımının verimliliği, stratejinin merkezinde yer almaktadır. Tarımda sulama tekniklerinin iyileştirilmesi, su tasarruflu teknolojilerin teşvik edilmesi ve suyun daha etkin bir şekilde kullanılması hedeflenmektedir.

4. İklim Değişikliğine Dayanıklı Altyapı Geliştirme: İklim değişikliği etkilerine dayanıklı su altyapısının geliştirilmesi önemlidir. Bu kapsamda, su depolama kapasitelerinin artırılması, su taşıma sistemlerinin güçlendirilmesi ve su yönetiminde bütüncül yaklaşımların benimsenmesi gerekmektedir.

5. Yönetim ve İşbirliği: Su kaynakları yönetimi için yerel yönetimler, sivil toplum kuruluşları, özel sektör ve uluslararası kuruluşlar arasında işbirliği ve koordinasyon önemlidir. Strateji, paydaşlar arasında bilgi ve deneyim paylaşımını teşvik eder.

Türkiye'nin İklim Değişikliği Uyum Stratejisi ve Eylem Planı, bu unsurları içeren bütüncül bir yaklaşım benimseyerek su kaynakları yönetiminde iklim değişikliği etkilerine karşı güçlü bir uyum stratejisi oluşturmayı amaçlamaktadır.

7.SONUÇ

İklim değişikliği, Dünya üzerinde ki mevcut su kaynaklarının stratejik önemini artırmaktadır. Birçok bölge çölleşme riskiyle karşı karşıya kalmakta ve gelecekte suyun, petrol kadar kıymetli bir kaynak haline dönüşmesi beklenmektedir (UNCCS, 2019; Görgüner ve ark., 2019; Kumanlıoğlu, 2020).

İklim değişikliği dünya genelinde su kaynakları üzerinde önemli ve kalıcı etkilere yol açmaktadır. Gelecek projeksiyonları, bu etkilerin daha da artacağını işaret etmektedir. Artan sıcaklık ve yağış rejimindeki değişimler, su kaynaklarının dağılımını, erimesini ve kurumasını etkilemektedir. Kutuplardaki buzulların erimesi deniz seviyelerini yükseltirken, bazı bölgelerde kuraklık riski artmakta ve su stresi yaşanmaktadır. Bu durum, tarım, içme suyu temini ve sanayi gibi temel ihtiyaçların karşılanmasında büyük zorluklar doğurabilir. Ayrıca, ekosistemler üzerindeki etkileri de göz ardı edilmemelidir; sucul yaşam alanları ve biyolojik çeşitlilik de olumsuz etkilenebilir. Dolayısıyla, iklim değişikliği ile mücadele edilmez ve uyum sağlanmazsa, gelecekte su kaynakları üzerindeki bu olumsuz etkilerin daha da derinleşeceği öngörülmektedir.

İklim değişikliğinin Türkiye su kaynakları üzerindeki etkileri için gerekli önlemler alınmazsa, Türkiye'nin çok yakın bir gelecekte su kıtlığıyla karşı karşıya kalacağı ve bu durumun sosyal ve ekonomik olarak pek çok olumsuz etkiye yol

açacağı açıktır. Gelecekteki projeksiyonlar, ülkemizin kuraklık ve su kıtlığı riskiyle karşı karşıya olduğunu göstermektedir. Bu nedenle mevcut su kaynaklarının etkin ve sürdürülebilir bir şekilde yönetilmesi zorunludur, çünkü bu kaynakların verimli kullanımı hayati önem taşımaktadır.

Türkiye'de su kaynakları yönetimi, iklim değişikliğinin etkilerini azaltma ve uyum sağlama çabalarıyla kritik bir döneme girmiştir. İklim değişikliğinin su kaynakları üzerindeki olumsuz etkileri kaçınılmazdır ve bu etkiler zamanla daha da belirgin hale gelmektedir. Bu bağlamda, su yönetiminde bütüncül, katılımcı, havza ölçekli ve veriye dayalı politikaların geliştirilmesi ve uygulanması gerekmektedir. Özellikle yağışlı dönemlerde suyun depolanması, kurak dönemlerde su arz güvenliğinin sağlanması ve su kayıp kaçaklarının azaltılması önem taşımaktadır.

Su kıtlığı yaşanan bölgelerde acil tedbirlerin alınması ve su baskısı altındaki havzalarda kişi başına düşen su miktarının artırılması için orta ve uzun vadeli stratejiler belirlenmelidir. Ayrıca, iklim değişikliğinin havza bazlı etkilerinin daha iyi anlaşılabilmesi için bilimsel araştırmaların teşvik edilmesi ve kamu kurumları ile üniversiteler arasında işbirliğinin artırılması gerekmektedir. Bu sayede, planlama ve projelerin kalitesi yükseltilerek, su yönetiminde daha etkili adımlar atılabilir ve su kaynaklarının sürdürülebilirliği sağlanabilir.

Sonuç olarak, Türkiye'nin su yönetimi politikalarının iklim değişikliğine dayanıklı hale getirilmesi ve su kaynaklarının etkin bir şekilde yönetilmesi için çeşitli düzeylerdeki tedbirlerin hızla hayata geçirilmesi kritik önem taşımaktadır. Bu süreçte, bilimsel verilerin iyileştirilmesi ve toplanması da stratejik bir rol oynamaktadır, böylece su kaynaklarının gelecek nesillere de sağlıklı bir şekilde aktarılması mümkün olabilir.

KAYNAKLAR

Abbass, K., Qasim, M. Z., Song, H., et al. (2022). A review of the global climate change impacts, adaptation, and sustainable mitigation measures. Environmental Science and Pollution Research, 29, 42539–42559. https://doi.org/10.1007/s11356-022-19718-6

Abiye, T. A., & Leketa, K. C. (2021). The need for managing historic groundwater in the Limpopo River Basin, southern Africa: Based on the δ18O, δ2H and 14C data. Groundwater for Sustainable Development, 14, 100583.

Alduchov, O. A., & Eskridge, R. E. (1996). Improved Magnus form approximation of saturation vapor pressure. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 35(4), 601–609.

Bastiancich, L., Lasagna, M., Mancini, S., et al. (2021). Temperature and discharge variations in natural mineral water springs due to climate variability: A case study in the Piedmont Alps (NW Italy). Environmental Geochemistry and Health. https://doi.org/10.1007/s10653-021-00864-8

Boulet, G., Jarlan, L., Olioso, A., & Nieto, H. (2020). Evapotranspiration in the Mediterranean region. In M. Zribi, L. Brocca, F. Tramblay, & F. Molle (Eds.), Water Resources in the Mediterranean Region (pp. 23–49). Elsevier. ISBN 0128180870 9780128180877

Bozorg-Haddad, O., Zolghadr-Asli, B., Sarzaeim, P., Aboutalebi, M., Chu, X., & Loáiciga, H. A. (2020). Evaluation of water shortage crisis in the Middle East and possible remedies. Journal of Water Supply: Research and Technology - AQUA, 69(1), 85–98.

Chen, J., Li, J., Zhang, X., et al. (2020). Ultra-sonication for controlling the formation of disinfection by-products in the ClO2 pre-oxidation of water containing high concentrations of algae. Environmental Geochemistry and Health, 42, 849–861.

Çapar, G. (2019). Su kaynakları yönetimi ve iklim değişikliği. In İklim Değişikliği Alanında Ortak Çabaların Desteklenmesi Projesi (iklimİN), İklim Değişikliği Eğitim Modülleri Serisi 8.

Delpla, I., Jung, A. V., Baures, E., Clement, M., & Thomas, O. (2009). Impacts of climate change on surface water quality in relation to drinking water production. Environment International, 35(8), 1225-1233.

Devlet Su İşleri (DSİ). (2021). 2020 Yılı Faaliyet Raporu. Ankara. Retrieved from https://cdniys.tarimorman.gov.tr/api/File/GetFile/425/KonuIcerik/759/1107/DosyaGaleri/DS%C4%B0%202020-yili-faaliyetraporu.pdf

Devlet Su İşleri (DSİ). (2023). 2022 Yılı Faaliyet Raporu. Ankara. Retrieved from [link provided] gov.tr/api/File/GetFile/425/Sayfa/759/1107/DosyaGaleri/2021_yili_faaliyet_raporu.pdf.

Erturk, A., Cuceloglu, G., Ekdal, A., Mehmet Kalfazade, Salim Yaykiran, Aslı Ozabalı Sabuncugil, Aysegul Tanik, & Ozturk, I. (2023). Estimation of Blue and Green Water Potentials of Türkiye under Global Climate Change Effects. In 2nd International Conference on Civil Infrastructure and Construction (CIC 2023), 5-8 February, 2023, Qatar University, Doha, Qatar.

Escanilla-Minchel, R., Alcayaga, H., Soto-Alvarez, M., Kinnard, C., & Urrutia, R. (2020). Evaluation of the impact of climate change on runoff generation in an Andean glacier watershed. Water, 12(12), 3547.

Fei, J., Ma, J., Yang, J., et al. (2020). Effect of simulated acid rain on stability of arsenic calcium residue in residue field. Environmental Geochemistry and Health, 42, 769–780.

Fentaw, F., Hailu, D., Nigussie, A., & Melesse, A. M. (2018). Climate change impact on the hydrology of Tekeze Basin, Ethiopia: Projection of rainfall-runoff for future water resources planning. Water Conservation Science and Engineering, 3(4), 267–278.

Golledge, N., Kowalewski, D., Naish, T., et al. (2015). The multi-millennial Antarctic commitment to future sea-level rise. Nature, 526, 421–425. https://doi.org/10.1038/nature15706

Gorguner, M., Kavvas, M. L., & Ishida, K. (2019). Assessing the impacts of future climate change on the hydroclimatology of the Gediz Basin in Turkey by using dynamically downscaled CMIP5 projections. Science of The Total Environment, 648, 481–499. doi:10.1016/j.scitotenv.2018.08.167

Hähnlein, S., Bayer, P., Ferguson, G., & Blum, P. (2013). Sustainability and policy for the thermal use of shallow geothermal energy. Energy Policy, 59, 914–925.

Hassan, M., Du, P., Mahmood, R., Jia, S., & Iqbal, W. (2019). Streamflow response to projected climate changes in the Northwestern Upper Indus Basin based on regional climate model (RegCM4.3) simulation. Journal of Hydro-environment Research, 27, 32–49.

Hock, R., & Huss, M. (2021). Glaciers and climate change. In Climate Change. Elsevier, Amsterdam, Netherlands, pp. 157–176. ISBN 9780444635242 0444635246.

Huntington, T. G. (2006). Evidence for intensification of the global water cycle: Review and synthesis. Journal of Hydrology, 319(1-4), 83–95.

IPCC. (2023). Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 35-115. doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.

Jahandideh-Tehrani, M., Zhang, H., Helfer, F., & Yu, Y. (2019). Review of climate change impacts on predicted river streamflow in tropical rivers. Environmental Monitoring and Assessment, 191(12), 1–23.

Karaman, S., & Gökalp, Z. (2010). Küresel Isınma ve İklim Değişikliğinin Su Kaynakları Üzerine Etkileri. Tarım Bilimleri Araştırma Dergisi, 3(1), 59-66.

Kılıç, Z. (2020). The Impact of Climate Change on Water Resources. International Journal of Scientific and Technological Research. Retrieved from www.iiste.org ISSN 2422-8702 (Online), DOI: 10.7176/JSTR/6-11-07 Vol.6, No.11, 2020.

Kløve, B., Ala-Aho, P., Bertrand, G., Gurdak, J. J., Kupfersberger, H., Kværner, J., Muotka, T., Mykrä, H., Preda, E., Rossi, P., & Uvo, C. B. (2014). Climate change impacts on groundwater and dependent ecosystems. Journal of Hydrology, 518, 250–266.

Konapala, G., Mishra, A. K., Wada, Y., & Mann, M. E. (2020). Climate change will affect global water availability through compounding changes in seasonal precipitation and evaporation. Nature Communications, 11(1), 1–10.

Kumanlioglu, A. A. (2020). Characterizing meteorological and hydrological droughts: A case study of the Gediz River Basin, Turkey. Meteorological Applications, 27, e1857.

Lipczynska-Kochany, E. (2018). Effect of climate change on humic substances and associated impacts on the quality of surface water and groundwater: A review. Science of The Total Environment, 640, 1548–1565.

López-Ballesteros, A., Senent-Aparicio, J., Martínez, C., & Pérez-Sánchez, J. (2020). Assessment of future hydrologic alteration due to climate change in the Aracthos River basin (NW Greece). Science of The Total Environment, 733, 139299.

Lu, Y., Li, H., Si, B., & Li, M. (2020). Chloride tracer of the loess unsaturated zone under sub-humid region: A potential proxy recording high-resolution hydroclimate. Science of The Total Environment, 700, 134465.

Maharjan, M., Aryal, A., Talchabhadel, R., & Thapa, B. R. (2021). Impact of climate change on the streamflow modulated by changes in precipitation and temperature in the north latitude watershed of Nepal. Hydrology, 8(3), 117.

Manna, F., Walton, K. M., Cherry, J. A., & Parker, B. L. (2019). Five-century record of climate and groundwater recharge variability in southern California. Scientific Reports, 9(1), 1–8.

NASA. (2024). The Effects of Climate Change. Retrieved October 3, 2024, from https://climate.nasa.gov/effects/

Panda, D. K., & Wahr, J. (2016). Spatiotemporal evolution of water storage changes in India from the updated GRACE-derived gravity records. Water Resources Research, 52(1), 135–149.

Pilevneli, T., Capar, G., & Sánchez-Cerdà, C. (2022). Investigation of climate change impacts on agricultural production in Turkey using volumetric water footprint approach. Sustainable Production and Consumption.

Pilevneli, T., Capar, G., & Sánchez-Cerdà, C. (2023). Investigation of climate change impacts on agricultural production in Turkey using volumetric water footprint approach. Sustainable Production and Consumption, 35, 605-623. DOI: https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.12.013

Rehana, S., & Mujumdar, P. P. (2011). River water quality response under hypothetical climate change scenarios in Tunga-Bhadra river, India. Hydrological Processes, 25(22), 3373–3386.

Santikayasa, I. P., Babel, M. S., & Shrestha, S. (2015). Assessment of the impact of climate change on water availability in the Citarum river basin, Indonesia: The use of statistical downscaling and water planning tools. In Managing water Resources Under Climate Uncertainty. Springer, Cham, pp. 45–64.

Scibek, J., Allen, D. M., Cannon, A. J., & Whitfield, P. H. (2007). Groundwater–surface water interaction under scenarios of climate change using a high-resolution transient groundwater model. Journal of Hydrology, 333(2-4), 165–181.

Sukanya S., & Sabu Joseph. (2023). Chapter 4 - Climate change impacts on water resources: An overview. In A. Srivastav, A. Dubey, A. Kumar, S. K. Narang, M. A. Khan (Eds.), Visualization Techniques for Climate Change with Machine Learning and Artificial Intelligence. Elsevier, pp. 55-76. ISBN 9780323997140.

T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı. (2023 – 2033). Değişen İklim İklime Uyum Çerçevesinde Su Verimliliği Strateji Belgesi ve Eylem Planı.

Taloor, A. K., Kotlia, B. S., & Kumar, K. (2021). Water, Cryosphere, and Climate Change in the Himalayas: A Geospatial Approach. Springer Nature, London, UK. ISBN 9783030679323.

Tian, P., Lu, H., Feng, W., Guan, Y., & Xue, Y. (2020). Large decrease in streamflow and sediment load of Qinghai–Tibetan Plateau driven by future climate change: A case study in Lhasa River Basin. Catena, 187, 104340.

Tokuslu, A. (2022). Assessing the Impact of Climate Change on Turkish Basins. International Journal of Environment and Geoinformatics (IJEGEO), 9(4), 102-112. doi: 10.30897/ijegeo.1066840.

United Nations (UN). (2024). The United Nations World Water Development Report 2024: Water for Prosperity and Peace. UNESCO, Paris.

United Nations Climate Change Secretariat (UNCCS). (2019). Climate action and support trends.

USGS. (2016). Su döngüsü - The Water Cycle, Turkish. U.S. Geological Survey. Retrieved October 2, 2024, from https://www.usgs.gov/special-topics/water-science-school/science/su-dongusu-water-cycle-turkish

Usman, M., Ndehedehe, C. E., Farah, H., & Manzanas, R. (2021). Impacts of climate change on the streamflow of a large river basin in the Australian tropics using optimally selected climate model outputs. Journal of Cleaner Production, 315, 128091.

Vanderhoof, M. K., Lane, C. R., McManus, M. G., Alexander, L. C., & Christensen, J. R. (2018). Wetlands inform how climate extremes influence surface water expansion and contraction. Hydrology and Earth System Sciences, 22(3), 1851–1873.

Vazifehkhah, S., & Kahya, E. (2019). Hydrological and agricultural droughts assessment in a semi-arid basin: Inspecting the teleconnections of climate indices on a catchment scale. Agricultural Water Management, 217, 413–425.

Wang, G., Gong, T., Lu, J., Lou, D., Hagan, D. F. T., & Chen, T. (2018). On the long-term changes of drought over China (1948–2012) from different methods of potential evapotranspiration estimations. International Journal of Climatology, 38(7), 2954–2966.

Water Calculator. (2018). The Impact of Climate Change on Water Resources. Retrieved October 2, 2024, from https://www.watercalculator.org/wateruse/climate-change-water-resources/

WMO-World Meteorological Organization. (2021). State of Climate in 2021: Extreme events and major impacts. Retrieved October 2, 2024, from https://public.wmo.int/en/media/press-release/state-of-climate-2021-extreme-eventsand-major-impacts

Wu, F., Zhan, J., Wang, Z., & Zhang, Q. (2015). Streamflow variation due to glacier melting and climate change in upstream Heihe River Basin, Northwest China. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 79, 11–19.



Şanlıurfa Çörtlerinin Mineralojisi, Petrografisi, Jeokimyası ve Süstaşı Olarak Kullanılabilirliği

İlkay Kaydu Akbudak[1] & Zeynel Başıbüyük[2]

[1] Dr. Öğr. Üyesi, KAEÜ. Müh.- Mim. Fakültesi/ Jeoloji Mühendisliği Bölümü, KIRŞEHİR
ORCID: 0000-0003-0884-5991
[2] Doç. Dr., KAEÜ. Müh.- Mim. Fakültesi/ Jeoloji Mühendisliği Bölümü, KIRŞEHİR
ORCID: 0000-0003-2845-148X

1. GİRİŞ

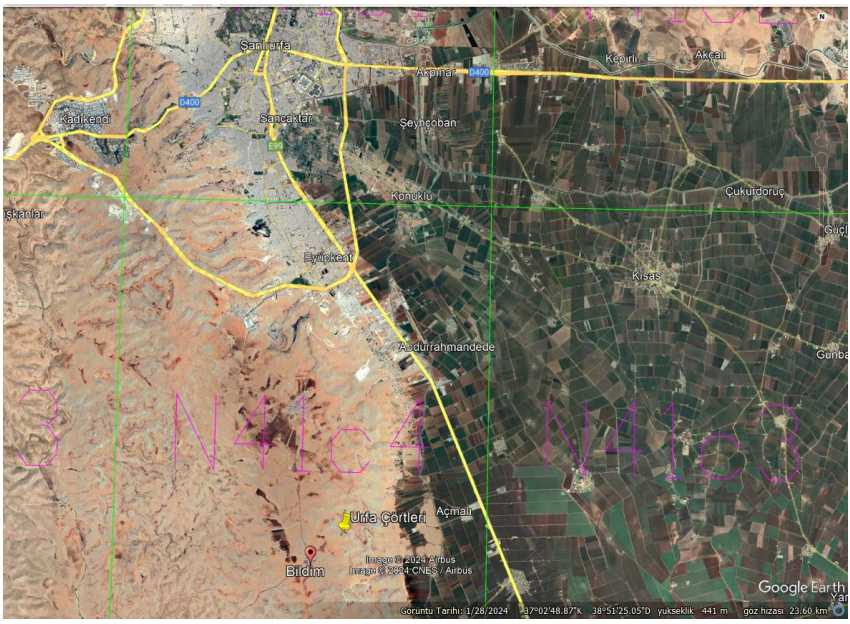
İnsanlık tarihi, doğayla olan etkileşimimizin ve taş kullanımımızın evrimi açısından uzun ve zengin bir seyahati yansıtır. İlkel dönemlerden günümüze kadar taşlar, hem temel ihtiyaçları karşılamak hem de sanatsal ifade biçimlerini geliştirmek için kullanılmıştır (Alkan vd., 2022). Özellikle silis grubu taşlar (kuvars, çört, kalsedon, vb.), bol miktarda bulunmaları ve fiziksel özellikleri (sertlik, konkoidal kırılma yüzeylerinin olması, atmosferik ve agresif ortamlardaki dayanıklılık vb.) nedeniyle (Kaydu Akbudak vd., 2018a,b; Arık ve Ruşen, 2022) insanlığın ilk aletlerinde önemli bir rol oynamıştır. Avcılık ve korunma gibi hayati ihtiyaçlardan, takı (Kaydu Akbudak vd., 2017) ve heykel gibi estetik unsurlara kadar taşın çok yönlü kullanımı, kültürel ve sanatsal gelişimin bir parçası olmuştur (Ekincioğlu vd., 2018).

Günümüzde doğal taş ve minerallere olan ilgi, bu tarihsel bağların sürdürücüsü olarak devam etmektedir (Başıbüyük vd., 2019). Bu bağlamda, fiziksel ve görsel özellikleri bakımından ilgi çeken kayaç ve minerallerin tespiti (Arık ve Özen, 2020; Kaydu Akbudak vd., 2021; 2022; 2023), jeolojik ve gemolojik özelliklerinin belirlenmesi büyük önem taşımaktadır (Başıbüyük vd., 2020, 2023; Gürbüz ve Demir, 2023) . Bu çalışmalar, yalnızca bilim literatürüne katkı sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda yerel ekonomiler için yeni fırsatlar yaratma potansiyeline de sahiptir. Doğal kaynakların doğru bir şekilde değerlendirilmesi, sürdürülebilir kalkınma açısından kritik bir adım olacaktır (Ekincioğlu vd., 2014, 2022). Bu bağlamda Şanlıurfa bölgesinde Alt Miyosen yaşlı killi kireçtaşı içerisinde bulunan çörtlerin jeolojik ve gemolojik özelliklerinin belirlenmesi bu çalışmanın ana amacını oluşturmaktadır.

Çört genellikle kireçtaşları içerisinde, küçük nodüller, mercekler veya bantlı yapılar halinde bulunan, son derece sert, mikrokristalen ve kriptokristalen bir kuvarstır (Knauth, 1979; Lapidus, 1990; Gürbüz ve Sabaz, 2022), çeşitli renk ve dokularda bulunabilir (Maliva ve Siever, 1989; Brandl, 2013; Liu ve Yan, 2007). Bu nedenle özellikle süstaşı olarak kullanıma uygun bir materyaldir. Estetik görünümü ve işlenebilirliği sayesinde, çörtler, tarih boyunca sanat ve mimaride değerli bir malzeme olarak değerlendirilmiştir. Bu taşlar, özellikle iç mekan dekorasyonu, heykeltraşlık, takı tasarımı ve çeşitli sanat eserlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

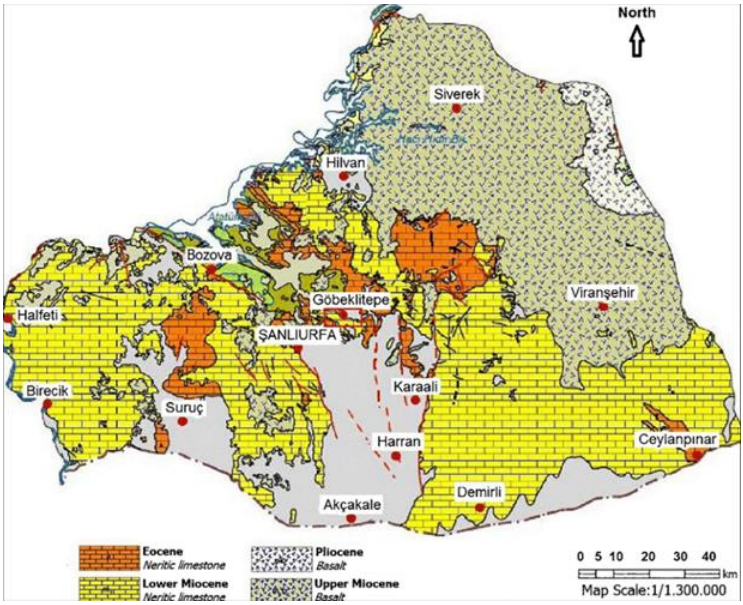
Çörtlerin süstaşı olarak kullanılabilirliği, mineralojik ve jeokimyasal özelliklerine bağlıdır. Bu bağlamda, çörtlerin sertlik, renk, dayanıklılık ve işlenebilirlik gibi özellikleri, onları süstaşı olarak tercih edilen bir malzeme haline getirdiğini

göstermektedir. Bu çalışma, Urfa ili Bildim Köyü bölgesindeki çörtlerin potansiyelini değerlendirerek, bu alandaki bilgi birikimine katkıda bulunmayı amaçlamaktadır. Bu çalışmada Urfa ili merkez sınırları içerisinde yer alan Bildim Köyü bölgesinde bulunan (Şekil 1) ve doğal taş ocağı olarak işletilecek sahadan alınan farklı renk ve dokudaki çörtlerin mineralojisi, petrografisi, jeokimyası ve süstaşı olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır.



Şekil 1. İnceleme sahası Google Earth haritası

Çört oluşumları Şanlıurfa il merkezine bağlı Bildim köyü civarındaki Alt Miyosen yaşlı killi kireçtaşı seviyeleri içerisinde bulunmaktadır (Şekil 2).



Şekil 2. Şanlıurfa jeoloji haritası (Akbaş vd. 2002)

2. MATERYAL VE METOD

Çörtlerin arazideki dağılımı ve makroskopik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla inceleme sahasından örnek alımı yapılmıştır. Bu örneklerin mineralojik bileşim ve dokusal özelliklerini belirlemek için ince kesitler hazırlanmış ve XRD (X-ray Diffraction) analizleri gerçekleştirilmiştir. Jeokimyasal içeriklerinin belirlenmesi amacıyla ise XRF (X-ray Fluorescence) incelemeleri yapılmıştır. Elmas kaplama testere, sinter elmas aşındırıcı diskler ve polisaj makinesi kullanılarak çört örneklerine süstaşı kesim teknikleri uygulanmış ve bu örneklerin aksesuar ve süstaşı olarak kullanılabilirlikleri değerlendirilmiştir.

3. BULGULAR

3.1. Saha Çalışması

Çört oluşumlarının içerisinde bulunduğu killi kireçtaşları beyaz renkli, ortakalın tabakalıdır (Şekil 3a, b). Görünür kalınlığı yaklaşık 200 m civarında olan kireçtaşları içerisinde yer yer 20 cm'ye yaklaşan boyutta yumrular halinde gri ve kahverengi tonların hakim olduğu çört oluşumları bulunmaktadır (Şekil 4).





(a) **(b)**

Şekil 3. İnceleme sahasındaki Alt Miyosen yaşlı kireçtaşı birimi (a-b)

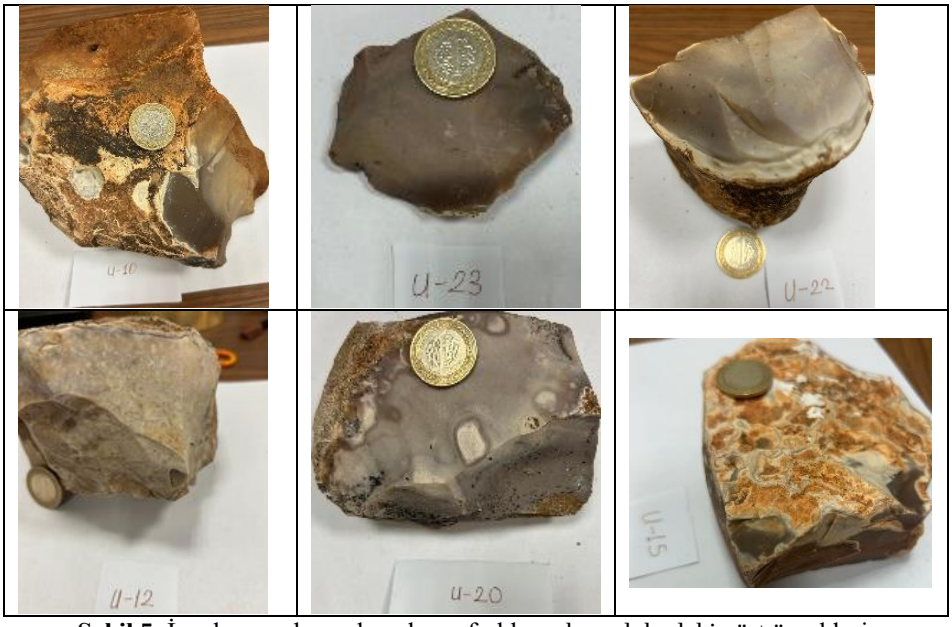




(a) **(b)**

Şekil 4. İnceleme sahasındaki Alt Miyosen yaşlı kireçtaşı birimi içerisindeki çörtler (a-b)

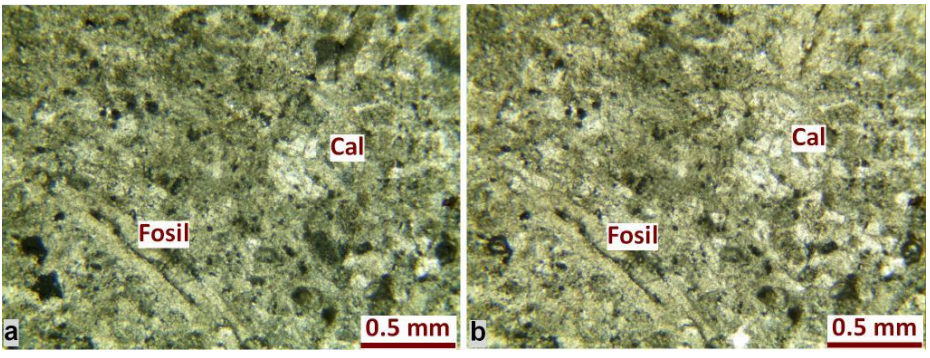
İnceleme sahasındaki çört oluşumları genellikle gri ve kahverenginin tonlarındaki renk ve masif görünümü ile karakteristik olup nadir olarak farklı renklere sahip zonlu doku göstermektedir (Şekil 5). Gevrek özelliğinden dolayı kırılma yüzeyleri konkoidaldir.



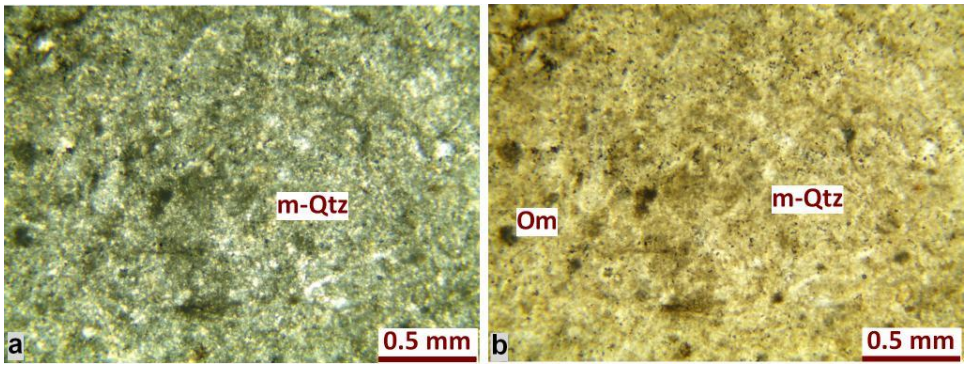
Şekil 5. İnceleme sahasından alınan farklı renk ve dokudaki çört örnekleri.

3.2. Mineraloji-Petrografi ve Jeokimya İncelemeleri

Yankayaçtan elde edilen ince kesitlerde, bol miktarda fosil ve ince taneli kalsit mineralleri gözlemlenmiştir (Şekil 6). Tek nikoldeki toprak benzeri koyuluklar, kayaçtaki kil minerallerinden kaynaklanmaktadır. Bu kayaç, fosilli killi kireçtaşı olarak tanımlanmıştır. Çörtten hazırlanan ince kesitte ise mikro kristalin kuvars mineralleri ve opak mineraller bulunmuştur (Şekil 7).

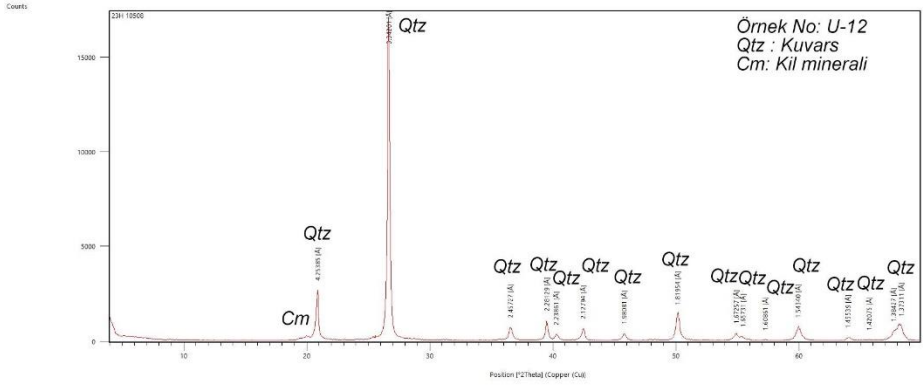


Şekil 6. İnceleme sahasındaki kireçtaşlarının ince kesit görüntüleri, Cal: Kalsit (a: Çift Nikol ; b: Tek Nikol).

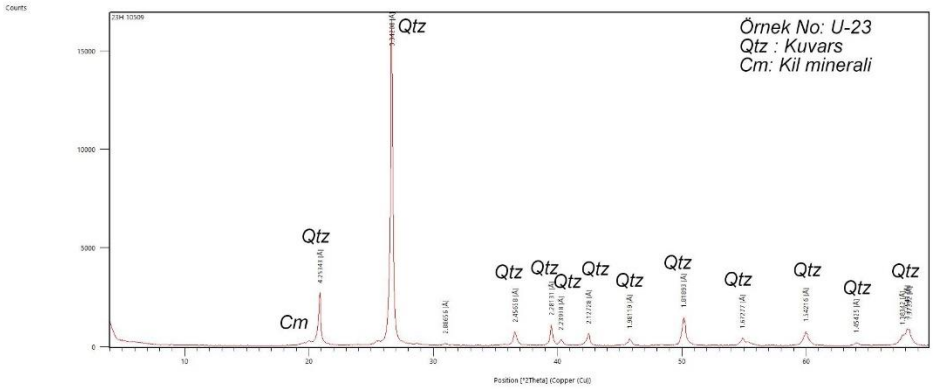


Şekil 7. İnceleme sahasındaki çörtlerin ince kesit görüntüleri, m-Qtz: Mikrokristalin kuvars, Om: Opak mineral (a: Çift Nikol ; b: Tek Nikol).

Farklı renk ve dokudaki iki çört örneğinden yapılan XRD analiz sonuçlarında kuvars ve kil minerali birlikteliği belirlenmiştir (Şekil 8, 9).



Şekil 8. İnceleme sahasındaki U-12 no'lu çört örneğinin XRD difraktogramı.



Şekil 9. İnceleme sahasındaki U-23 no'lu çört örneğinin XRD difraktogramı.

İnceleme sahasından alınan farklı renk ve dokudaki iki çört örneğinden yapılan XRF analiz sonuçlarında SiO_2 içeriği % 96.7 (U-12) - 96.8 (U-23) ve Fe_2O_3 içeriği her iki örnekte % 0.8 olarak belirlenmiştir (Tablo 1).

Tablo 1. İnceleme sahasındaki çört örneklerinin XRF sonuçları





% Mass	U-12	U-23
SiO_2	96.8	96.7
Al_2O_3	0.2	0.1
CaO	0.5	0.3
Fe_2O_3	0.8	0.8
K2O	<0,1	<0,1
MgO	0.2	0.2
MnO	<0,1	<0,1
Na_2O	<0,1	<0.1
P_2O_5	<0,1	<0,1
TiO_2	<0,1	<0,1
A.Za	1.30	1.50

3.3. Süs Objesi Üretim Çalışmaları

Bildim bölgesinde bulunan çört örnekleri kesme, zımparalama ve cilalama işlemlerine tabi tutularak bu örneklerden hediyelik aksesuarlar ve süstaşı üretimi gerçekleştirilmiştir (Şekil 10). Çörtlerin desenleri, işlenebilirlik, dayanıklılık, iyi cila tutma gibi özelliklerinden dolayı takı, aksesuar ve koleksiyon amaçlı ürünlerin oluşturulmasına elverişli oldukları belirlenmiştir.



Şekil 10. İnceleme sahasındaki takıda kullanılmak üzere çörtlerden yapılan süstaşları.

4. TARTIŞMA VE SONUÇ

İnceleme sahasındaki gri ve kahverengi tonların hakim olduğu çapları 20 cm ye kadar ulaşan, çok ince taneli kuvars ve opak minerallerden oluşan, yaklaşık % 96.8 SiO_2 ve % 0.8 Fe_2O_3 içeren çört yumrularının; desenleri, işlenebilirlik, dayanıklılık, iyi cila tutma gibi özelliklerinden dolayı takı, aksesuar ve koleksiyon amaçlı ürünlerin oluşturulmasına elverişli oldukları belirlenmiştir. Arazi gözlemleri bölgedeki jeolojik rezervin bu alanda yapılacak küçük bir süstaşı işletmesi için yeterli bir kaynak sunabileceği yönündedir.

Sonuç olarak, süs objesi olarak kullanılabilecek kayaç ve mineraller alanındaki bu araştırmaların artması, hem yerel hem de küresel ekonomik kalkınmaya

katkı sağlayacak, doğal kaynakların sürdürülebilir bir şekilde değerlendirilmesine olanak tanıyacaktır. Bu nedenle, doğal taş ve minerallerin araştırılmasının ve ekonomiye kazandırılmasının, hem bilimsel hem de ekonomik açıdan büyük faydalar sağlayacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

Alkan, Y., Gölbaş, A., Ekincioğlu, G., Başıbüyük, Z. (2022) "Engineering Properties of The Natural Building Blocks Used At The Karincali Byzantium Church (Kirşehir, Turkey) And Source Rock Identification (Kirşehir-Turkey)", Kitap: Orta Anadolu Arkeoloji, Antropoloji Ve Sanat Tarihi Araştırmaları, Ankara/Türkiye : Myrina Yayınları

Akbaş B, Akdeniz N, Aksay A, Altun İ, Balcı V, Bilginer E, Bilgiç T, Duru M, Ercan T, Gedik İ, Günay Y, Güven İH, Hakyemez HY, Konak N, Papak İ, Pehlivan Ş, Sevin M, Şenel M, Tarhan N, Turhan N, Türkecan A, Ulu Ü, Uğuz MF, Yurtsever A (2002). Türkiye Jeoloji Haritası Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Yayını. Ankara Türkiye

Arık, F., & Özen, Y. (2020). Tokat Yöresi Jasper Oluşumlarının Mineralojik-Petrografik, Jeokimyasal Özellikleri ve Süstaşı Olarak Kullanılabilirliği. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 9(1), 451-460.

Arık, F., & Ruşen, A. (2022). Döllük ve Gümenek (Tokat-Türkiye) Kalsedonlarının Jeokimyasal Özellikleri. Türkiye Jeoloji Bülteni, 65(3), 255-272.

Başıbüyük, Z., Akbudak, I. K., & Gürbüz, M. (2020). Mineralogical, geochemical and gemological investigation of Artova Ch-chalcedonies, Tokat–Turkey.

Başibüyük, Z., Gürbüz, M., & Akbudak, I. K. (2023). Surprise eggs, the miracle of nature: almus agates (Tokat-Turkiye). Gospodarka Surowcami Mineralnymi-Mineral Resources Management, 5-22.

Başıbüyük Z., Ekincioğlu G., Önal M. M., (2019). Yozgat Sarıkaya Termal Roma Hamamı'nda Kullanılan Doğal Yapı Taşları ve Mühendislik Özellikleri. Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlik Fakültesi Dergisi, 34(1), 233-244.,

Brandl, M. (2013). Genesis, provenance and classification of rocks within the chert group in Central Europe. Archaeologia Austriaca, 33-58.

Ekincioğlu, G., Başıbüyük, Z., Gölbaş, A., & Kaydu Akbudak, İ. (2018). Geçmişten Günümüze Doğaltaş Mozaik Sanatı ve Geleceğe Aktarılması. International Journal of Interdisciplinary and Intercultural Art, 3(4), 81-91.

Ekincioğlu, G., Başıbüyük, Z., Büyükbayrak, F., & Kaydu Akbudak, İ., (2022). Kırşehir bölgesi mermerlerinin mikronize kalsit olarak kullanılabilirliğinin araştırılması. Aksaray University Journal of Science and Engineering, 6(2), 178-191.

Ekincioğlu, G., Başıbüyük, Z., Ekdur, E., Ballı, F., & Kanbir, E. S. (2014). Kırşehir Doğal Taş Sektör Analizi ve Yatırım İmkânları Raporu. Kırşehir Sanayi ve Ticaret Odası.

Gürbüz, M., & Demir, B. (2023). Musalı (Mersin –Türkiye) Malahit - Azurit Oluşumlarının Mineralojik Ve Gemolojik Özelikleri. Geosound, 58(1), 135-160.

Gürbüz, K., & Sabaz, S. (2022). Jura-Kretase Yaşlı Demirkazık Formasyonunun Üst Seviyelerindeki Çört Oluşumu (Karaisalı Kuzeyi-Adana). Geosound, 56(1), 15-37.

Kaydu Akbudak, İ., Başıbüyük, Z., Ekincioğlu, G., & Ekdur, E., (2023). Kırşehir Ve Aksaray Bölgesi Bantlı Traverten Oluşumlarının Süstaşı Olarak Kullanımı. Uluslararası Disiplinlerarası ve Kültürlerarası Sanat, 8(16), 1-12.

Kaydu Akbudak, İ., Başıbüyük, Z., & Gürbüz, M. (2018a). "Yozgat 'Aydıncık' kalsedon-ametist oluşumlarının mineralojisi-petrografisi ve ekonomikliliğinin incelenmesi", DÜMF MD, c. 9, sy. 1, ss. 313–324, 2018.

Kaydu Akbudak, İ., Başıbüyük, Z., & Gürbüz, M. (2021). Silicified woods consist with malachite, azurite, and hematite in the Middle Eocene Çekerek Formation, Tokat—Turkey. Lithology and Mineral Resources, 56, 548-558.

Kaydu Akbudak, İ., Başıbüyük, Z., Gürbüz, M., Önal, A. Ö., & İşler, F., (2018b) "Yamadağ Volkanitleri İçerisinde Silisli Süstaşları: Mineralojik, Jeokimyasal, Gemolojik Özellikleri ve Ekonomik Önemleri, Arguvan-Malatya", Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 33 (1) pp. 211-219

Kaydu Akbudak İ.,Gölbaş A., Başıbüyük Z., (2017). Kırşehir Müzesi Envanterinde Bulunan Yüzüklerin Arkeogemolojik Ve Jeoarkeolojik İncelemesi. Uluslararası Sosyal Araştırmalar DergisiThe Journal of International Social Research, 10 (52), 524- 534.,

Kaydu Akbudak, İ., Ketenci, D. E., & Gürbüz, M. (2022). Kaman (Kırşehir-Türkiye) floritlerinin mineralojik ve gemolojik özellikleri. Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 12(4), 1012-1023.

Knauth, L.P., (1979). Origin of chert in limestone. Geology 7, 274–277.

Lapidus, D. F. (1990) Collins Dictionary of Geology, Collins, London and Glasgow, 565p

Liu XY, Yan JX (2007) Nodular Chert of the Permian Chihsia Formation from South China and Its Geological Implications. Acta Sedimentologica Sinica 25(5): 730-736

Maliva, R. G., & Siever, R. (1989). Nodular chert formation in carbonate rocks. The Journal of Geology, 97(4), 421-433.



750 kWe, 993 kWp Gücünde Bir Güneş Enerjisi Santrali için Ön Değerlendirme Analizi ve Simülasyonu

***Furkan Dinçer*[1]**

[1] Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü

1. Giriş

Güneş enerjisinden elektrik enerjisi üretimi artık hayatımızın vazgeçilmez bir elektrik enerjisi üretim kaynağı olmuş ve olmaya devam etmektedir. Güneş enerjisinden elektrik enerjisi üretim maliyetleri 10 yıl önce yaklaşık 1,3 USD/Wp değerlerindeyken günümüzde bu maliyet değerleri 0,35 USD/Wp değerlerine kadar düşmüştür. Bu rakamlar elektrik enerjisi üretiminde güneş enerjisinin artık ucuz bir kaynak olduğunu göstermektedir. Son 10 yılda maliyetlerde yaşanan bu dramatik düşüş gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerin güneş enerjisine olan ilgi ve kaynak aktarmalarından kaynaklanmaktadır. Hücre üretim teknolojisinin gelişmesi, insansız makine üretim parkurlarının daha çok yer alması, mevcut hücre teknolojisindeki ilerlemeler ile daha yüksek verim değerlerine sahip hücre üretilebilir olması vb. nedenler sıralanabilir. Günümüzde talebin üzerinde hücre üretim tesislerinin bulunması da maliyetleri aşağı çekmiştir. Bu konuda özellikle Çin, dünya lideri konumdadır. Ülkemizde de artık güneş hücresi üretilebilmektedir. Dolayısı ile hücre üretim teknolojisinin takip edilmesi ve teknolojiye ayak uydurulması büyük önem arz etmektedir [1, 2].

Ülkemizde de son 5 yıl içerisinde güneş enerjisi santrallerinin kurulumu hızlı bir şekilde artmaya başlamış ve devam etmektedir. Bunun nedeni maliyetleri dramatik düşüş ve mevzuat açısından kurulum kolaylıklarının sağlanmasıdır. Çünkü, güneş enerjisi santrali kurulumları yapılırken mevzuata uygun olması ve en önemlisi bağlantı yapılacak hat kapasitesinin yeterli olması gerekmektedir. Ülkemizin 2024 Temmuz ayında toplam elektrik enerjisi santral kurulu gücü 111.105 MW değerine ulaşırken, toplam santral sayısı da 26.944 adet olmuştur. Lisanssız güneş kurulu gücü bir önceki aya göre artarak 14.032 MW'a ulaşırken, lisanslı güneş kurulu gücünde 1.669 MW seviyesinde kalmıştır. Temmuz ayında güneş enerjisinden elektrik enerjisi üretimi kurulu gücü 2023 Temmuz ayına göre ise %39 artış göstererek hızlı bir ilerleme kaydetmiştir. Böylece toplam güneş enerjisi santrali kurulu gücü de 15.701 MW değerine yükselmiştir [3-5].

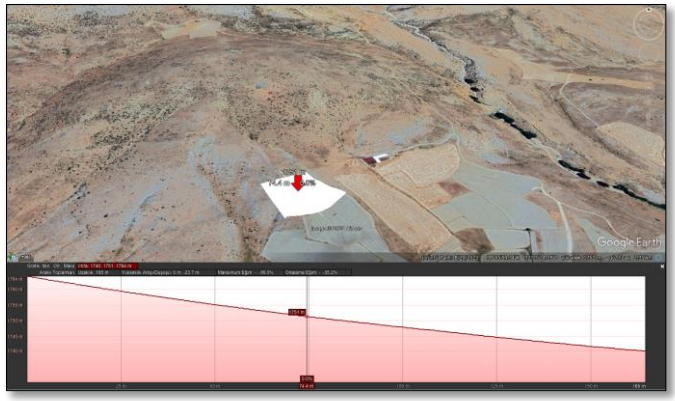
Bu çalışmada, 750 kWe AC elektriksel güç, 993 kWp DC panel gücüne sahip olarak tasarlanmış bir santral için ön değerlendirme analizi ve simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Güneş enerjisi santralleri modüler olduğu için istenilen ölçeklerde kurulabilir ve işletilebilir özelliklere sahiptir. Böylece ihtiyaç kadar tasarlanabilir ve kurulabilir. Bu durumlarda arazi yapısı, hat kapasitesi, trafo merkezi güneş enerji santrali kapasitesi gibi parametreler de önemli rol oynamaktadır. Günümüzde artık santral kurulumlarında santralin maksimum performansta çalışması için de önemli çalışmalar yürütülmektedir. Bu çalışmaların yapılması ile kaynakların daha etkin kullanılması sağlanmaktadır. Bu çalışma da bu durum için

gerçekleştirilmiştir. Öncelikle arazinin Topografik yapısına bakılarak panel yerleşimi gölgelenmenin en az olabileceği şekilde konumlandırılmış ve eğim açıları da buna göre belirlenmiştir. Bu değerlerin belirlenmesi için simülasyon programı kullanılmıştır. Simülasyon programında Lokasyon bilgisi girilerek lokasyona özel iklim verileri ve ışınım verileri dikkate alınarak santralin ne kadar elektrik enerjisi üretebileceği aylara göre detaylı olarak analiz edilmiştir. Bu sayede bu kurulumu yapacak veya yaptıracak yatırımcı üretim değerlerine göre planlama yapabilmektedir.

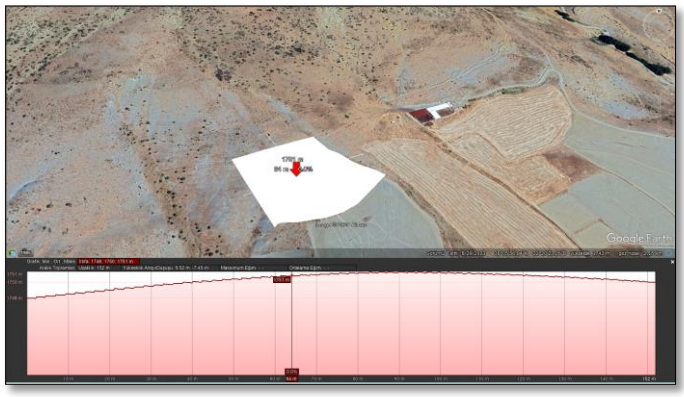
2. Santral Lokasyon Bilgileri

Proje; 750 kWe AC, 993 kWp DC, elektriksel güç değerlerinden meydana gelmektedir. Projenin lokasyonu Konya İli, Selçuklu İlçesi, Sızma Cumhuriyet Köyü, 225 Ada, 27 Parsel şeklindedir. Koordinatlar: Enlem koordinatı 38.1003 ve Boylam koordinatı 32.3402 şeklindedir. Rakım yaklaşık olarak 1750 metre'dir. Arazi, Konya merkeze 38 km mesafede olup 52 dk. uzaklık mesafesindedir. Bölgenin en önemli ulaşım noktalarından biri olan Konya Havalimanı'na ise 37 km mesafededir.

Arazinin rakımı, 1750 metre civarlarındadır. Şekil 1'de arazinin kuzey-güney yükseklik profili gösterilmektedir. Şekil 2'de arazinin orta kısmından; batıdan doğuya doğru yükseklik profiline bakıldığında batı ile doğu arasında önce artan sonra azalan bir meyil olduğu görülmektedir.



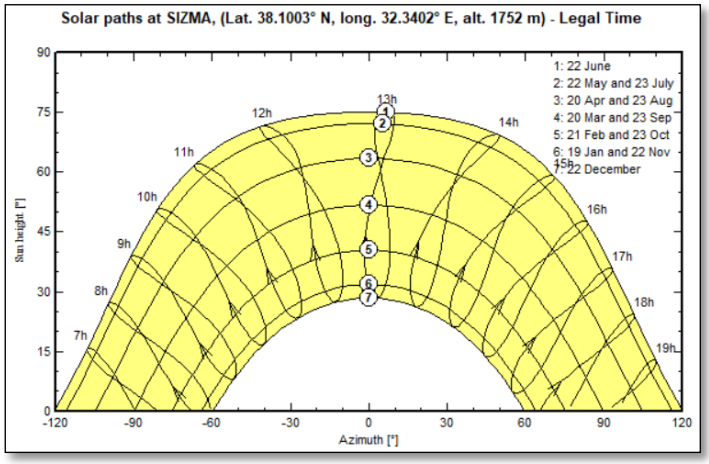
Şekil 1. Arazinin kuzey-güney yükseklik profili



Şekil 2. Arazinin doğu-batı yükseklik profili

Şekil 1'e göre kuzey kısmından; kuzeyden güneye doğru yükseklik profiline bakıldığında kuzey ile güney arasında 23 metre kot farkı olduğu görülmektedir. Ortalama eğim %30 civarındadır. Noktasal uzunluk göz önünde bulundurulduğunda güneye tam olarak meyilli bir arazi yapısı bulunmaktadır. Şekil 2'de arazinin doğu-batı yükseklik profili gösterilmektedir.

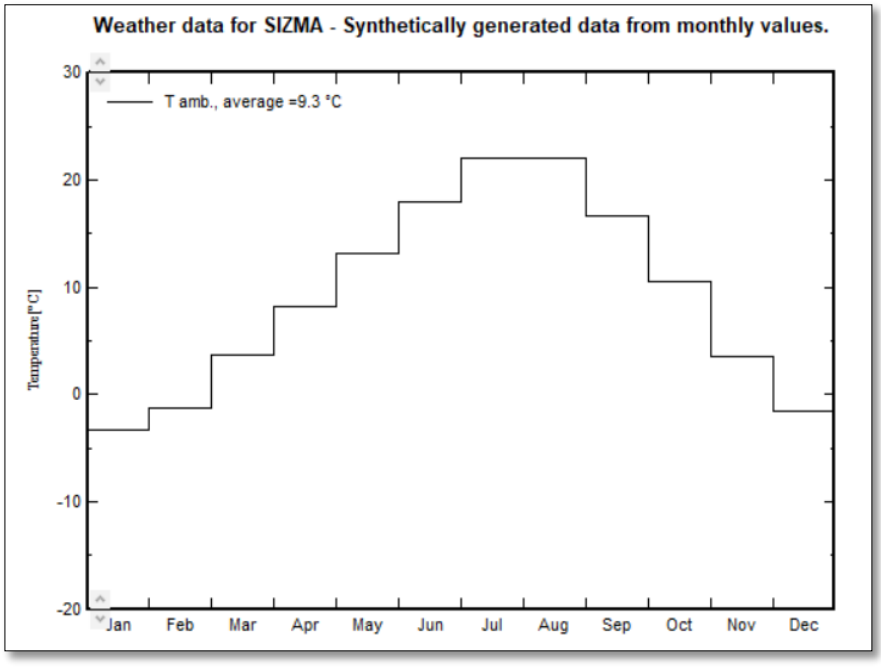
Şekil 2'ye göre 388 metrelik bir mesafede yaklaşık olarak 1748 metre rakımdan başlayıp 1751 metre rakıma artmakta ardından 1750 metre rakıma inmektedir. Tatlı bir meyil olduğu gözlemlenmektedir. Şekil 3'te arazinin azimuta göre güneş eğrisi gösterilmektedir. Özellikle azimutun 0^0 olduğu zamanda en yüksek güneşlenme değerinin yakalandığı gözlemlenmektedir. Işıma olarak da iyi bir lokasyon olduğu ifade etmektedir.



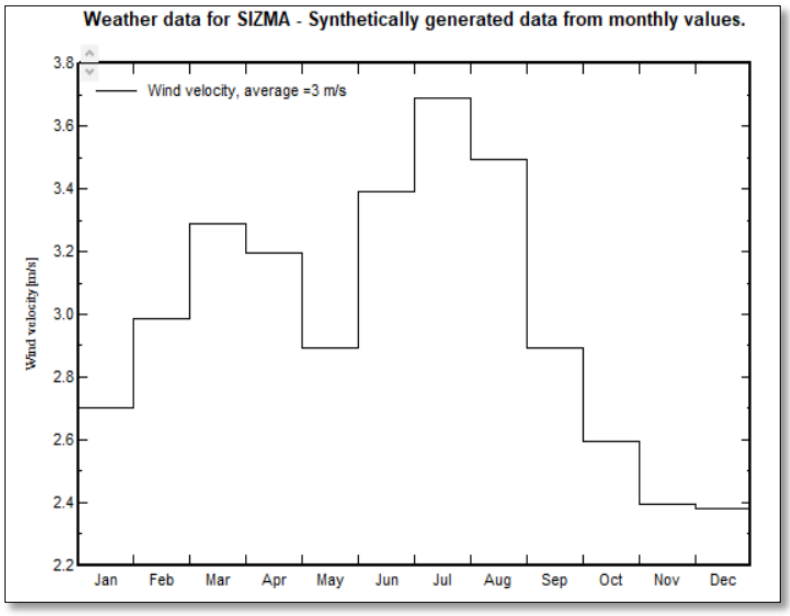
Şekil 3. Arazinin azimuta göre güneş eğrisi

Projede toplam 1.712 adet 580 Wp gücünde güneş paneli kullanılmaktadır. Toplam DC panel kurulu güç değeri 993 kWp şeklindedir. AC kurulu güç değeri ise 750 kWe olup DC yüklenme oranı % 32,4 değerindedir. DC Yüklenme değeri farklı eksenler için arttırılarak daha fazla elektrik enerjisi üretilebilir ve performans artırımı sağlanabilir.

Şekil 4'te seçilen lokasyon için aylara göre hava sıcaklık değişimi ve Şekil 5'te ise aylara göre rüzgâr hızı değişimi gösterilmektedir. Şekil 4'e göre özellikler yaz aylarında sıcaklıklar artarken sonbahar ve kış aylarında sıcaklık değerleri düşmektedir. Özellikle Aralık, Ocak ve Şubat aylarında aylık sıcaklık ortalama değerleri 0^0'nin altına düşmektedir. Karasal iklimin etkileri görülmektedir. Şekil 5 incelendiğinde ise ilkbahar aylarında rüzgar hızı değerleri artarken yaz aylarına doğru azalmaktadır. Ancak, yaz aylarında rüzgar hızı değerleri yükselmektedir. Kış aylarında ise rüzgar hızları oldukça düşmektedir. Genel olarak yıl ortalamasına bakıldığında ortalama rüzgar hızı 3 m/s olduğu gözlemlenmektedir.

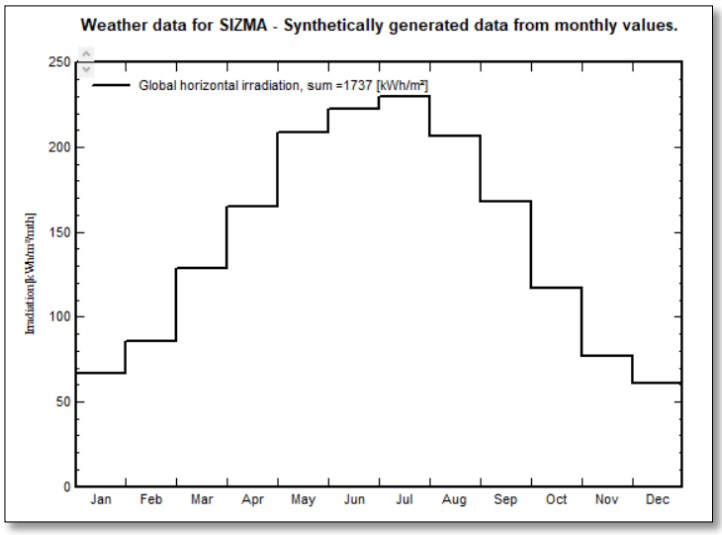


Şekil 4. Seçilen lokasyon için aylara göre hava sıcaklık değişimi



Şekil 5. Seçilen lokasyon için aylara göre rüzgar hız değişimi

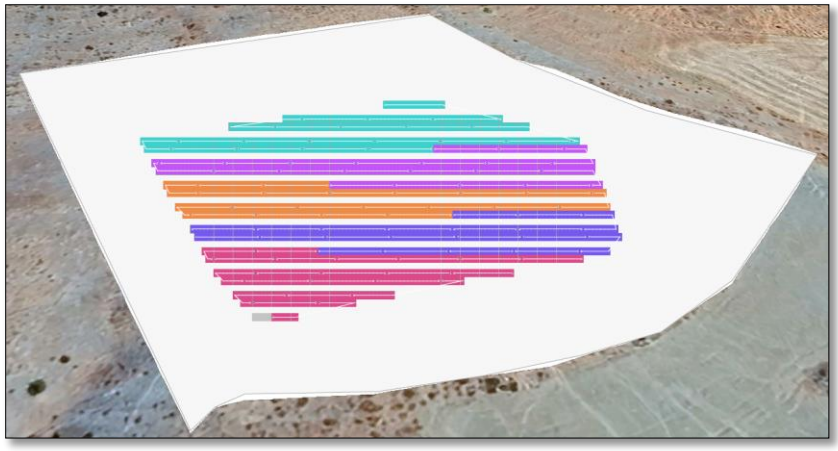
Yıl ortalaması sıcaklık değerine bakıldığında ortalam sıcaklık değerinin 9,3 C olduğu görülmektedir. Kasım, Aralık, Ocak ve Şubat aylarında sıcaklık aylık ortalama değerleri düşük iken yaz aylarında ortalama sıcaklık değerlerinin 20 C üzerinde olduğu gözlemlenmektedir. Rüzgar verilerine bakıldığında ise aylara göre asimetrik bir değişim göstermektedir. Kasım ve Aralık aylarında rüzgar hız değerleri çok düşük iken özellikle Temmuz ve Ağustos aylarında rüzgar hızının daha yüksek olduğu gözlemlenmektedir. Özellikle üretimin yüksek olduğu, ışıma ve sıcaklık değerlerinin yüksek olduğu Temmuz ve Ağustos aylarıdır. Bu aylarda rüzgar hızının da en yüksek seviyeye ulaşması güneş enerjisi santrali için önemli bir parametredir. Panellerin rüzgar ile soğuması, panel sıcaklık değerlerinin azalması ile elektrik enerjisi üretim performansı da artacaktır. Şekil 6'da seçilen lokasyon için aylara göre ışınım şiddetinin değişimi gösterilmektedir. Şekil incelendiğinde özellikle yaz aylarında ışınım şiddeti en yüksek değerlere ulaşmaktadır. En düşük ışınım şiddeti ise Ocak ve Aralık aylarında olduğu görülmektedir. Yıllık ortalama ışınım şiddeti değeri ise 1737 kWh/m^2 olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 6. Seçilen lokasyon için aylara göre ışınım şiddetinin değişimi

3. Modelleme ve Simülasyon Sonuçları

Seçilen Lokasyon için arazi Topografik yapısı, güneş ışınım şiddeti ve iklim dataları detaylı olarak incelendikten sonra modelleme ve simülasyon analizleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 7'de modelleme görüntüsü verilmiştir.



Şekil 7. Tasarlanan model için 3D görüntüsü

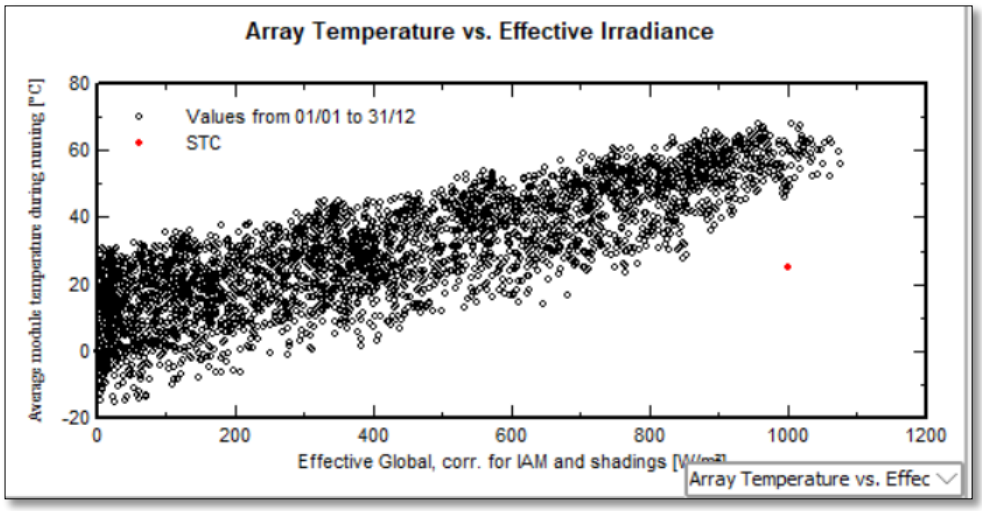
Tablo 1'de aylara göre simülasyon sonuçları çizelgesi verilmiştir. Aylara göre ışınım değerlerinin değişimi, hava sıcaklık ortalama değerleri, elektrik enerjisi

üretim değerlerinin değişimi ve performans oranı değerleri detaylı olarak sunulmuştur.

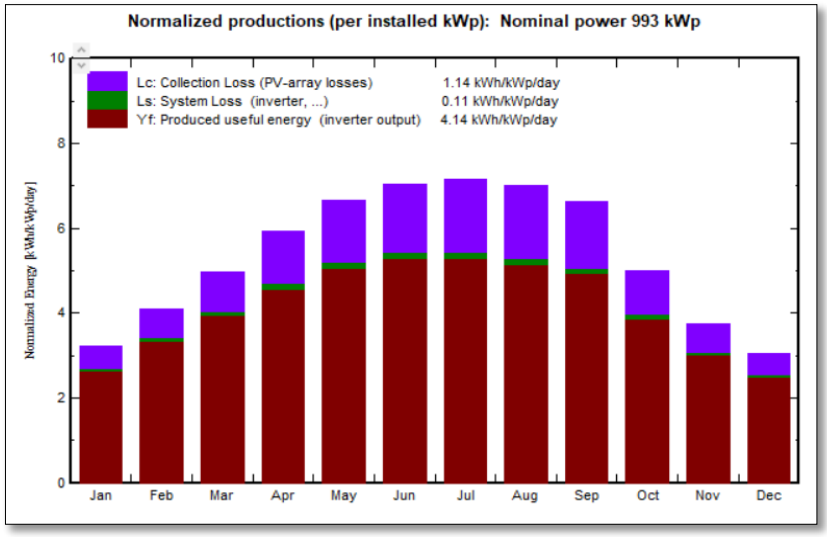
Tablo 1. Aylara göre simülasyon sonuçları çizelgesi

	GlobHor kWh/m²	DiffHor kWh/m²	T_Amb °C	GlobInc kWh/m²	GlobEff kWh/m²	EArray kWh	E_Grid kWh	PR ratio
January	66.9	26.97	-3.30	99.9	87.2	83116	81027	0.817
February	85.3	37.94	-1.20	114.5	99.7	95066	92804	0.816
March	128.7	58.42	3.71	153.7	133.9	124433	121294	0.795
April	164.9	64.48	8.15	177.9	154.4	139864	136289	0.772
May	208.6	79.46	13.17	206.6	179.3	159920	155839	0.760
June	222.8	66.88	17.99	211.6	183.5	161540	157369	0.749
July	229.7	59.36	22.05	221.9	192.7	167495	163117	0.740
August	206.7	54.64	22.00	217.2	188.6	163006	158695	0.736
September	168.2	45.50	16.61	198.7	172.9	150972	146989	0.745
October	117.3	37.92	10.51	155.2	135.5	122106	118938	0.772
November	77.0	31.14	3.56	112.1	97.8	91832	89645	0.805
December	61.0	25.89	-1.56	94.3	82.2	78689	76803	0.820
Year	1737.0	588.62	9.37	1963.7	1707.8	1538039	1498809	0.769

Tablo 1'de sunulan simülasyon sonuçları incelendiğinde yıllık elektrik enerjisi üretim toplamının 1.498.809 kWh olduğu görülmektedir. En yüksek üretim Temmuz ayında 163.117 kWh olmaktadır. En düşük üretimin olduğu ay ise Aralık ayı olduğu gözlemlenmektedir. Bu ayda gerçekleşen elektrik enerjisi üretim değerinin 76.803 kWh olduğu görülmektedir. Benzer şekilde ışınım değerlerinin birim alanda en yüksek elektrik enerjisi üretimi sağladığı ayların yaz ayları olduğu görülmektedir. Temmuz ayında bu değer 229,7 kWh/m^2 iken Mayıs, Haziran ve Ağustos aylarında 200 kWh/m^2 değerinin üzerinde olduğu tespit edilmiştir. Şekil 8'de dizi sıcaklığı ile ışınım şiddeti değişiminin değişimi ve Şekil 9'da normalize edilmiş üretim ve sistem kayıp değerlerinin aylara göre değişimi detaylı olarak sunulmuştur.



Şekil 8. Dizi sıcaklığı ile ışınım şiddeti değişiminin değişimi



Şekil 9. Normalize edilmiş üretim ve sistem kayıp değerlerinin aylara göre değişimi

Tablo 2'de yapılan modelleme ve simülasyon çalışmalarına göre ekonomik analiz çalışması gerçekleştirilmiştir. Tablo 2'de elektrik abone tarife grubunun

Sanayi olduğu baz alınmıştır. EPDK elektrik tarifeler grubu tabloları baz alındığında Sanayi tarife grubu için elektrik enerjisi birim fiyatı 2,74 TL/kWh iken tüketim tarafında dağıtım bedeli 0,602 TL/kWh olarak belirtilmiştir. Simülasyon sonucunda ortalama yıllık elektrik enerjisi üretimi 1.498.809 kWh olurken yıllık net faydalanma tutarı 5.013.516 TL olarak hesaplanmıştır. Yatırım maliyeti de dikkate alındığında amorti süresinin 4,28 yıl olması beklenmektedir.

Tablo 2. Ekonomik analiz

AC / Gücü	750 kWe
DC / Panel Gücü	992,96 kWp
Ada	225
Parsel	27
Lokasyon	Konya / Selçuklu / Sızma Cumhuriyet Köyü
Yüzölçümü (Parsel)	13.200 m^2
Mülkiyet	Var
Ortalama Yıllık Üretim Tahmini (kWh/Yıl)	1.498.809 kWh
Elektrik Birim Fiyatı (TL/kWh), (Sanayi)	2,74 TL/kWh
Dağıtım Bedeli (TL/kWh), (Sanayi)	0,602 TL/kWh
Vergiler Hariç Toplam Elektrik Birim Fiyatı, (TL/kWh) (Sanayi)	3,345 TL/kWh
Yıllık Net Faydalanma, Vergi Hariç (TL)	5.013.516 TL/Yıl
Yıllık Gelir (USD) (1 USD=33 TL)	151.925 USD/Yıl
GES Birim Maliyeti (USD/MWp), ENH Hariç	650.000 USD/MWp
GES Maliyeti (USD)	650.000 USD
Amorti (Yıl)	4,28 Yıl

4. Kaynaklar

[1]. Furkan Dinçer, The analysis on photovoltaic electricity generation status, potential and policies of the leading countries in solar energy, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 15, Issue 1, pp. 713-720, 2011.

[2]. Sabir Rustemli, Furkan Dincer, Modeling of Photovoltaic Panel and Examining Effects of Temperature in Matlab/Simulink. Elektronika Ir Elektrotechnika, 109(3), 35-40. 2011.

[3]. Enerji Ajansı, https://enerjiajansi.com.tr/turkiyenin-kurulu-gucu/, Erişim Tarihi: 23.08.2024.

[4]. GENSED, https://www.gensed.org/basin/temmuz-ay%C4%B1nda-g%C3%BCne% C5%9F- enerjisinden-e lektrik-%C3%BCretimige%C3%A7en-temmuz-ay% C4%B1n a-g %C3%B6re-3 8-art %C4%B1, Erişim Tarihi: 23.08.2024.

[5]. Yük Tevzi Bilgi Sistemi, https://ytbsbilgi.teias.gov.tr/ytbsbilgi/ytbsbilgi.jsf, Erişim Tarihi: 23.08.2024.



Azimut Açısının Güneş Enerjisi Santrali Üretiminde Performansa Etkisinin Analiz Edilmesi

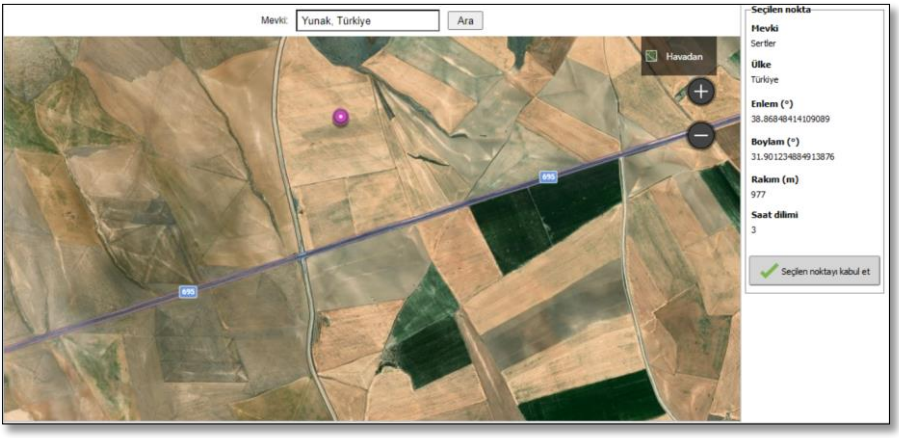
***Furkan Dinçer*[1]**

[1] Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü

1. Giriş

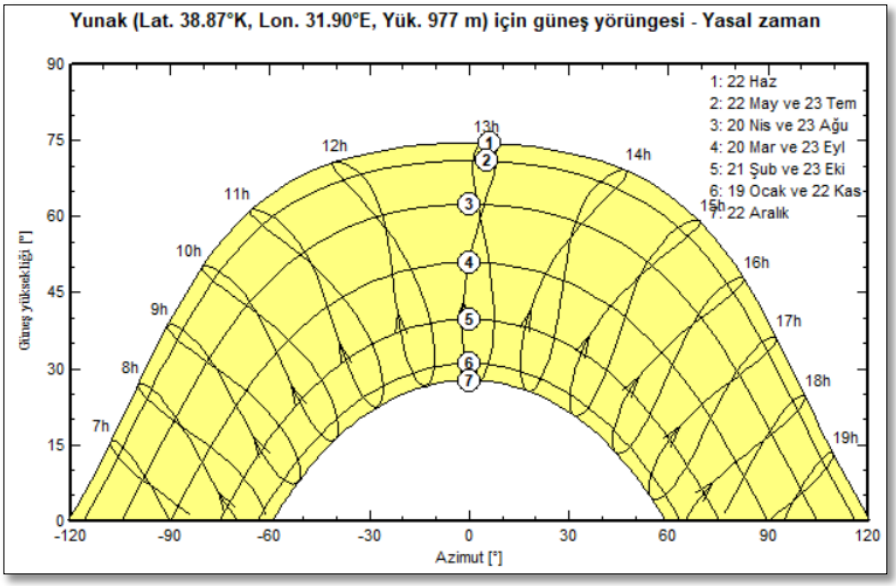
Güneş enerjisinden elektrik enerjisi üretimi hayatamızın vazgeçilmez bir parçası olmuştur. Günümüzde herşey elektrik enerjisine bağlı durumdadır. Dolayısı ile artan elektrik enerjisi ihtiyacı ise yeşil, çevre dostu, modüler ve sınırsız kaynak olan güneş enerjisinden rahatlıkla karşılanabilmektedir. Günümüzde güneş enerjisinden elektrik enerjisi üretim maliyeti de en ucuz kaynaklar arasında yer almaktadır. Bundan dolayı güneş enerjisinden elektrik enerjisi üretimi büyük önem arz etmektedir [1, 2].

Bu çalışmada azimut açısının güneş enerjisi santrali üretiminde performansa etkisinin analiz edilmesi amaçlanmıştır. Bu amaç ile öncelikle lokasyon seçimi yapılmıştır. Lokasyon için Konya ili, Yunak ilçesi seçilmiştir. Enlem, boylam değerleri ve lokasyona ait harita görseli Şekil 1'de sunulmuştur. Rakım değeri yaklaşık olarak 977 metredir.



Şekil 1. Güneş enerjisi santrali için lokasyon seçimi

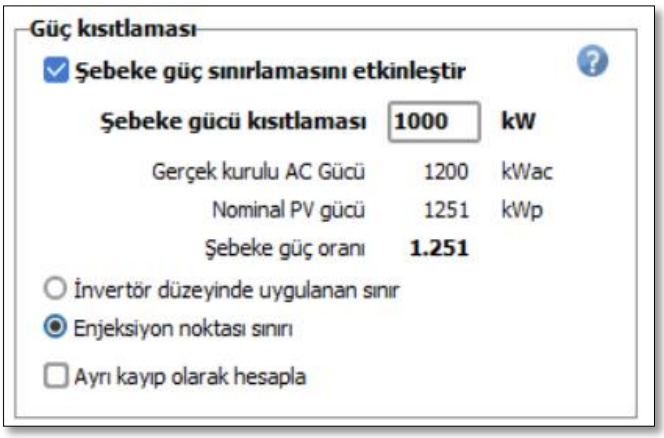
Seçilen lokasyona ait güneş yörüngesi azimut açı değerlerine ve güneş yükseklik açı değerlerine göre detaylı olarak gösterilmektedir. Özellikle 22 Haziran tarihinde güneş yüksekliği en yüksek değerine ulaşırken 22 Aralık tarihinde ise güneş yüksekliği en düşük seviyede yani en alçak seviyeden geçmektedir. Dolayısı ile en yüksek üretim de hem güneşlenme süresi hem de güneş yüksekliğinden ötürü Haziran-Ağustos aylarında meydana gelmektedir.



Şekil 2. Azimut açı değerlerine göre güneş yörüngesinin değişimi

2. Materyal ve Yöntem

Seçilen lokasyona göre 4 adet 300 kW invertör, 2275 adet 550 W bifacial (çift yüzlü) güneş paneli kullanılmıştır. Panel yüzey alanı toplam değeri 5825 m^2 şeklindedir. Toplam panel kurulu güç değeri 1.251,25 kWp olmuştur. Santral için elektriksel güç değeri ise 1000 kW olarak belirlenmiştir. Şekil 3'te güç kısıtlama tablosu gösterilmektedir. Bu tabloya göre 1000 kW değerinin üzerinde şebekeye enerji verilmemektedir. Güç limitleme uygulanmıştır.

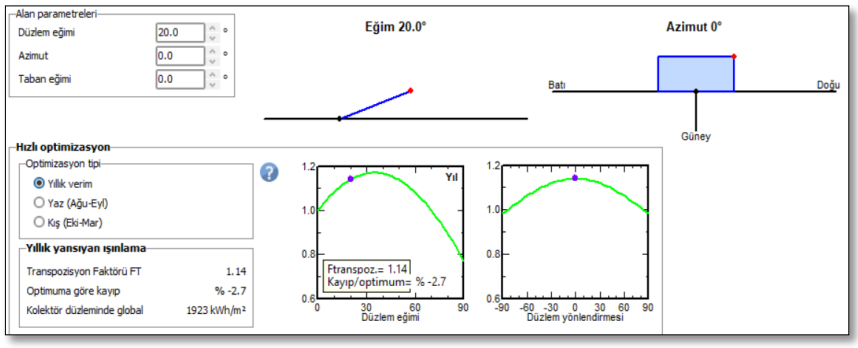


Şekil 3. Güç limitlemesi

Bu çalışmada azimut açısının güneş enerjisi santrali üretiminde performansa etkisinin analiz edilmesi amaçlandığı için santralin elektriksel ve panel güç değerleri sabit tutularak santralin azimut değerleri değiştirilmiştir. Sehpa açı değeri, güç limit değerleri ve diğer parametreler sabit tutularak azimut açı değerinin performansa olan etkisi doğrudan analiz edilmiştir. Bu analiz için PVsyst 8 simülasyon programı kullanılmıştır.

Seçilen lokasyonun yıllık ortalama sıcaklık değeri 12,55 ^{0}C, ışınım değeri ise 1687,6 kWh/m^2 şeklindedir.

Birinci üretim senaryosunda azimut açı değeri 0^0 olarak belirlenmiştir. Şekil 4'te azimut açı değeri gösterilmektedir. Üretim değerleri Tablo 1'de sunulmuştur. Tablo 1'e göre toplam elektrik enerjisi üretim değeri 1.783.742 kWh olarak gerçekleşmiştir.

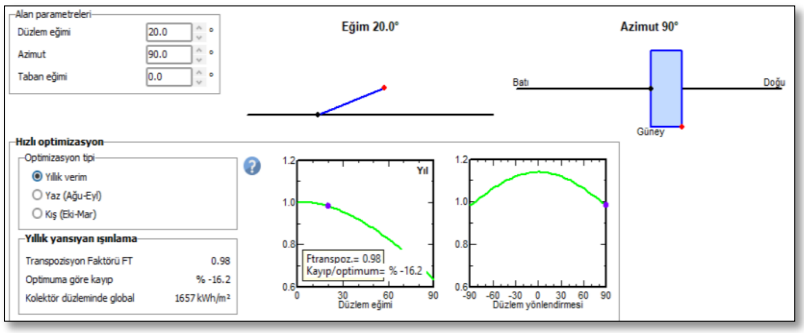


Şekil 4. Azimut açı değeri 0^0 (üretim senaryosu-1)

Tablo 1. Çevresel parametreler ve elektrik enerjisi üretim değerlerinin aylara göre değişimi - azimut açı değeri 0^0

	GlobHor kWh/m²	DiffHor kWh/m²	T_Amb °C	GlobInc kWh/m²	GlobEff kWh/m²	EArray kWh	E_Grid kWh	PR oran
Ocak	64.7	29.73	0.47	90.2	82.5	101563	99436	0.881
Şubat	79.3	34.97	2.23	102.2	93.4	111536	109373	0.855
Mart	123.8	56.20	6.94	143.8	131.8	143510	140862	0.783
Nisan	160.2	66.33	11.30	173.3	158.8	159554	156829	0.723
Mayıs	204.8	64.57	16.35	207.5	190.8	175157	172080	0.663
Haziran	219.1	66.79	20.90	214.6	197.5	197707	194492	0.724
Temmuz	224.3	68.41	25.03	222.1	204.4	206609	203278	0.732
Ağustos	204.3	61.09	24.94	216.7	199.8	191506	188453	0.695
Eylül	163.8	48.59	19.52	189.7	174.3	176980	174295	0.734
Ekim	111.2	45.92	13.42	139.5	128.0	142804	140303	0.804
Kasım	74.1	27.55	6.79	104.4	95.3	113600	111448	0.853
Aralık	58.0	25.06	1.96	85.1	77.3	94926	92893	0.873
Yıl	1687.6	595.22	12.55	1889.2	1733.9	1815451	1783742	0.755

İkinci üretim senaryosunda azimut açı değeri 90^0 olarak belirlenmiştir. Şekil 5'te azimut açı değeri gösterilmektedir. Aynı şekilde diğer üretim senaryolarındaki gibi sehpa eğim değeri aynı sabit tutulmuştur. Diğer tüm parametreler aynıdır. Üretim değerleri ise Tablo 2'de sunulmuştur. Tablo 2'ye göre toplam elektrik enerjisi üretim değeri 1.682.806 kWh olarak gerçekleşmiştir.

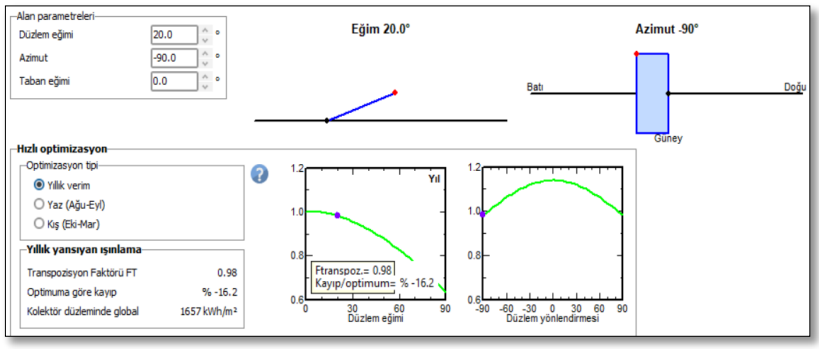


Şekil 5. Azimut açı değeri 90^0 (üretim senaryosu-2)

Tablo 2. Çevresel parametreler ve elektrik enerjisi üretim değerlerinin aylara göre değişimi - azimut açı değeri 90^0

	GlobHor kWh/m²	DiffHor kWh/m²	T_Amb °C	GlobInc kWh/m²	GlobEff kWh/m²	EArray kWh	E_Grid kWh	PR oran
Ocak	64.7	29.73	0.47	62.6	55.5	68725	66560	0.849
Şubat	79.3	34.97	2.23	77.5	69.8	85676	83548	0.862
Mart	123.8	56.20	6.94	119.5	109.1	130203	127492	0.853
Nisan	160.2	66.33	11.30	153.9	141.5	164947	162055	0.841
Mayıs	204.8	64.57	16.35	199.4	184.7	208331	204868	0.821
Haziran	219.1	66.79	20.90	211.8	196.2	217152	213767	0.807
Temmuz	224.3	68.41	25.03	218.6	202.4	220481	217026	0.794
Ağustos	204.3	61.09	24.94	195.3	180.5	196873	193655	0.793
Eylül	163.8	48.59	19.52	159.6	146.6	165033	162284	0.813
Ekim	111.2	45.92	13.42	110.5	100.4	117091	114574	0.828
Kasım	74.1	27.55	6.79	72.4	64.7	77763	75638	0.835
Aralık	58.0	25.06	1.96	58.3	51.3	63405	61339	0.841
Yıl	1687.6	595.22	12.55	1639.3	1502.7	1715679	1682806	0.820

Üçüncü üretim senaryosunda azimut açı değeri -90^0 olarak belirlenmiştir. Şekil 6'da azimut açı değeri gösterilmektedir. Aynı şekilde diğer üretim senaryolarındaki gibi sehpa eğim değeri aynı sabit tutulmuştur. Diğer tüm parametreler aynıdır. Üretim değerleri ise Tablo 3'te sunulmuştur. Tablo 3'e göre toplam elektrik enerjisi üretim değeri 1.697.553 kWh olarak gerçekleşmiştir.

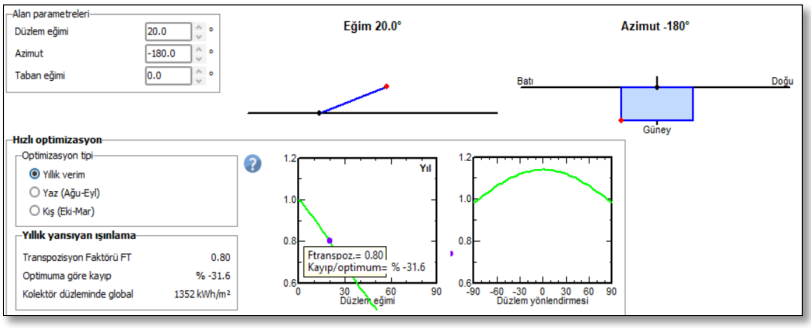


Şekil 6. Azimut açı değeri -90^0 (üretim senaryosu-3)

Tablo 3. Çevresel parametreler ve elektrik enerjisi üretim değerlerinin aylara göre değişimi - azimut açı değeri -90^0

	GlobHor kWh/m²	DiffHor kWh/m²	T_Amb °C	GlobInc kWh/m²	GlobEff kWh/m²	EArray kWh	E_Grid kWh	PR oran
Ocak	64.7	29.73	0.47	63.4	56.5	70220	68079	0.858
Şubat	79.3	34.97	2.23	77.7	69.9	86097	83939	0.864
Mart	123.8	56.20	6.94	121.8	111.0	133175	130461	0.856
Nisan	160.2	66.33	11.30	157.6	144.8	169325	166395	0.844
Mayıs	204.8	64.57	16.35	198.7	183.3	208280	204788	0.824
Haziran	219.1	66.79	20.90	214.3	198.7	220583	217138	0.810
Temmuz	224.3	68.41	25.03	218.8	202.4	221700	218197	0.797
Ağustos	204.3	61.09	24.94	201.0	185.8	203615	200356	0.797
Eylül	163.8	48.59	19.52	160.7	146.5	166270	163491	0.813
Ekim	111.2	45.92	13.42	106.8	96.4	113383	110880	0.830
Kasım	74.1	27.55	6.79	73.2	64.7	78420	76265	0.833
Aralık	58.0	25.06	1.96	55.2	48.1	59627	57563	0.833
Yıl	1687.6	595.22	12.55	1649.1	1508.3	1730695	1697553	0.823

Dördüncü üretim senaryosunda azimut açı değeri -180^0 olarak belirlenmiştir. Şekil 7'de azimut açı değeri gösterilmektedir. Aynı şekilde diğer üretim senaryolarındaki gibi sehpa eğim değeri aynı sabit tutulmuştur. Diğer tüm parametreler aynıdır. Üretim değerleri ise Tablo 4'te sunulmuştur. Tablo 4'e göre toplam elektrik enerjisi üretim değeri 1.377.599 kWh olarak gerçekleşmiştir



Şekil 7. Azimut açı değeri -180^0 (üretim senaryosu-4)

Tablo 4. Çevresel parametreler ve elektrik enerjisi üretim değerlerinin aylara göre değişimi - azimut açı değeri -180^0

	GlobHor kWh/m²	DiffHor kWh/m²	T_Amb °C	GlobInc kWh/m²	GlobEff kWh/m²	EArray kWh	E_Grid kWh	PR oran
Ocak	64.7	29.73	0.47	34.9	28.0	34450	32139	0.736
Şubat	79.3	34.97	2.23	50.7	42.5	52431	50237	0.791
Mart	123.8	56.20	6.94	94.7	83.6	101312	98639	0.832
Nisan	160.2	66.33	11.30	135.0	122.4	145444	142692	0.845
Mayıs	204.8	64.57	16.35	186.5	171.5	197977	194754	0.835
Haziran	219.1	66.79	20.90	207.2	191.7	216216	213028	0.822
Temmuz	224.3	68.41	25.03	209.5	192.9	214448	211182	0.806
Ağustos	204.3	61.09	24.94	176.2	161.4	180294	177267	0.804
Eylül	163.8	48.59	19.52	125.6	111.2	128260	125611	0.799
Ekim	111.2	45.92	13.42	74.9	63.6	75394	72842	0.777
Kasım	74.1	27.55	6.79	39.0	30.8	37127	34843	0.715
Aralık	58.0	25.06	1.96	27.8	21.9	26614	24365	0.700
Yıl	1687.6	595.22	12.55	1361.9	1221.5	1409969	1377599	0.808

3. Sonuç ve Değerlendirme

Santralin lokasyonu, elektriksel ve mekanik güç değerleri ve diğer parametreler sabit tutularak santralin farklı azimut açı değerleri için elektrik enerjisi üretim değerleri detaylı olarak analiz edilmiştir. Tablo 5'te üretim senaryolarına göre karşılaştırmalı özet sonuçlar gösterilmektedir. Ayrıca normalize edilmiş değişim değerleri de belirtilmiştir.

Tablo 5. Farklı azimut açı değerlerine göre üretim değerlerinin değişimi

Azimut Açı Değeri	Üretim Değeri	Normalize Edilmiş Değişim
Üretim Senaryosu-1 (0^0)	1.783.742 kWh	1
Üretim Senaryosu-2 (90^0)	1.682.806 kWh	0,943
Üretim Senaryosu-3 (-90^0)	1.697.553 kWh	0,951
Üretim Senaryosu-4 (-180^0)	1.377.599 kWh	0,772

Tablo 5'e göre en iyi elektrik enerjisi üretim değeri üretim senaryosu-1 olan azimut açı değerinin 0^0 olduğu durumda gerçekleşmiştir. Ancak santralin tam güneye doğru azimut açı değerinde tam 90^0 sapma meydana geldiğinde yaklaşık %5 performans kaybı yaşanmaktadır. Arazilerin yapısına göre santralin güneyden bir miktar sapması durumunda önemli derecede üretim kayıplarının yaşanmayacağını göstermektedir.

4. Kaynaklar

[1]. F. Dincer, "The analysis on photovoltaic electricity generation status, potential and policies of the leading countries in solar energy", Renewable and sustainable energy reviews, 15(1), pp. 713-720, 2011.

[2]. S. Yilmaz, F. Dincer, "Optimal design of hybrid PV-Diesel-Battery systems for isolated lands: A case study for Kilis, Turkey", Renewable and sustainable energy reviews, 77, pp. 344-352, 2017.



Bitüm Modifikasyonunda Polipropilen Kullanımı: Bir Literatür Taraması

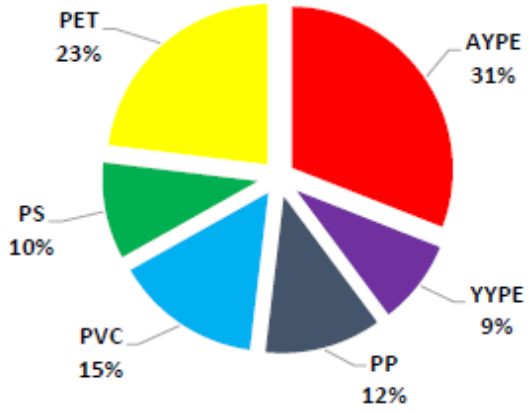
***Nimet İnkaya*[1]**

[1] Öğr. Gör., Ardahan Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, İnşaat Bölümü, 75000, Merkez, Ardahan, ORCID: 0000-0002-1624-9578

1. GİRİŞ

Ekonomik gelişmenin sonucu olan artan trafik ve daha yüksek trafik yükleri, değişen iklim ve çevre koşullar ile birleşerek mevcut asfalt kaplamaların istenilen performansı gösterememesine ve yeni katkı maddelerinin karışım ve bitüm modifikasyonunda kullanılmasını zorunlu kılmaktadır. Araştırmacılar bu bağlamda çalışmalar yapmışlar (Bozdemir, Oruc ve Yesilcicek, 2023; Isacsson ve Lu, 1999; Munera ve Ossa, 2014; Pérez-Lepe ve diğerleri, 2003; Porto ve diğerleri, 2023) ve yapmaya devam etmektedirler. Karışım ve bitüm modifikasyonunda kullanılan en yaygın katkı maddesi olan polimerlerin makro moleküllerinden elde edilen plastikler; hem ucuz hem de çevreci çözümler sunması sebebiyle dikkat çeken bir katkı malzemesidir. Karışım ve bitüm modifikasyonunda kullanılan plastikler: Termoplastik ve termosetler olmak üzere ikiye ayrılır. Tüketici sonrası oluşan toplam plastik atıkların %80' ini termoplastikler, yaklaşık %20' sini termosetler oluşturmaktadır. Polietilen (PE), polipropilen (PP), etilen–vinil asetat (EVA), polietilen tereftalat (PET), stiren–bütadien–stiren (SBS)' termoplastiklere örnek olarak verilebilir.

Plastikler, yüksek molekül ağırlıklı organik moleküllerden ya da polimerlerden oluşan ve birbirine kimyasal olarak bağlı birimlerin yenilenmesiyle ortaya çıkan zincir yapılardır. İstenilen biçimi alabilen anlamına gelen yunanca "plastikos" sözcüğünden türetilen plastik, kimyasal ve fiziksel özelliklerinden dolayı geniş kullanım alanına sahiptir (Çağatay ve Çobanoğlu, 1997). Şekil 1' de Türkiye' de üretilen termoplastiklerin dağılımı verilmiştir. Bu geniş kullanım alanı tüketim oranını da artırarak ciddi bir çevre sorununa yol açmaktadır. Dünya ve ülkemizde her geçen gün yıllık kişi başına ortalama plastik tüketim miktarı artmaktadır. Türkiye'de yıllık kişi başına ortalama plastik tüketiminin 1995 yılında 14 kg, 1999 yılında 30 kg iken 2023 de 75 kg civarında olduğu tahmin edilmektedir. Üretim veya tüketim atığı olarak iki şekilde karşımıza çıkan bu atıklar geri dönüşüm tesislerinde işlenerek veya katkı maddesi olarak asfaltta kullanılarak ekonomiye girdi olarak eklenebilir (İnkaya, 2016). Şekil 2' de atık geri dönüşüm tesislerinde işlenen atık miktarlarına ait veriler verilmiştir.



Şekil 1. Plastik Hammadde Üretimi-2023/3 (Pagev, 2023)

	2020		2022	
	Tesis sayısı	İşlenen atık miktarı (Ton)	Tesis sayısı	İşlenen atık miktarı (Ton)
Atık bertaraf ve geri kazanım tesisleri	**2 752**	**127 401 232**	**3 136**	**133 183 175**
Atık bertaraf tesisleri	**184**	**78 333 403**	**200**	**81 446 031**
Düzenli depolama tesisi	174	77 762 423	191	80 996 500
Yakma tesisi	10	570 980	9	449 532
Atık geri kazanım tesisleri	**2 568**	**49 067 829**	**2 936**	**51 737 143**
Kompost tesisi	9	127 046	11	120 096
Beraber yakma (ko-insinerasyon) tesisi	50	1 298 579	59	3 154 270
Diğer geri kazanım tesisleri (1)	2 509	47 642 204	2 866	48 462 778

Tablodaki rakamlar yuvarlamadan dolayı toplamı vermeyebilir.
Tesislere yurtdışından gelen atıklar dahildir.
(1) Metal, plastik, kağıt, mineral vb. atıkların geri kazanımını yapan tesisleri içermektedir.

Şekil 2. Atık Bertaraf ve Geri Kazanım Tesis Göstergeleri-2022 (TÜİK, y.y.)

Plastik atıkların tekstil, gıda ve imalat endüstrilerinde ve çoğu mühendislik alanında geri dönüştürülmesi ve yeniden kullanımı, özellikle son yirmi yılda yol

kaplama araştırmaları alanında, saf bitümün modifikasyonu veya alternatif agregalar ve/veya dolgu maddesi olarak kullanılmak üzere tasarlanmış yeni ve yenilikçi polimerler yapmak amacıyla araştırılmaktadır.

Buna dayanarak, bu derleme polipropilen ve türevlerinin bitüm özellikleri üzerindeki etkisini kapsamlı bir şekilde değerlendirmek için yapılmıştır. Bu çalışmada, bitümün polipropilen ile modifiye edildiği çalışmaları inceleyerek, polipropilen modifikasyonunun bitümün fiziksel ve reolojik özellikleri üzerindeki etkilerinin araştırılması amaçlanmıştır. Bu bağlamda, öncelikle polipropilen hakkında temel bilgiler verilmiştir. Ardından, polipropilen modifiyeli bitümün hazırlanma koşulları, polipropilen modifikasyonunun bitüm özellikleri üzerindeki etkisi ve polipropilen modifiyeli bitümün asfalt karışımlarının performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Ayrıca, polipropilen ve diğer katkı maddeleri kullanılarak kompozit modifiyeli bitüm hazırlanmasına yönelik çalışmalardan da bahsedilmiştir.

2. METOT

Bu çalışmada Web of Science ve Google Akademik veri tabanları kullanılmıştır. Belirtilen veri tabanlarında "polypropylene modified asphalt", "polypropylene modified bitumen", "recycle polypropylene modifed asphalt", "recycle polypropylene modified bitumen", "plastic waste", "polypropylene", "asphalt", and "bitumen" terimleri kombinasyon halinde aratılarak literatür taraması yapılmıştır. Bu çalışmanın makale havuzu, bu tarama sonucunda bulunan yayınlardan bitüm modifikasyonunu içeren çalışmalarla oluşturulurken, polipropilenin diğer alanlarda kullanımını içeren çalışmalar elenmiştir. Makale havuzunda yer alan yayınlar incelendiğinde kontrol bitüm numunesi açısından iki tip çalışma olduğu görülmektedir. Bunlardan ilki, saf bitümün polipropilen ile modifiye edildiği çalışmaları içermektedir. İkincisi ise, polipropilenin başka bir katkı maddesi ile birlikte bitüme eklenerek kompozit modifiye bitümün hazırlandığı çalışmalardır. Bu derlemede, saf bitümünün modifiye edildiği çalışmalar esas olarak, polipropilenin diğer herhangi bir katkı maddesinden bağımsız olarak bitümün fiziksel ve reolojik özellikleri üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla incelenmiştir. Kompozit modifikasyonunda polipropilen kullanımına ilişkin çalışmalar ayrı bir bölümde incelenmiştir. Bu çalışmanın alt başlıklarında, okuyucuya polipropilenin özellikleri, türleri ve üretimi hakkında temel bilgiler sağlamak amacıyla Bölüm 3'te polipropilen hakkında açıklamalar verilmiştir. Daha sonra, modifiye bitümün hazırlanma koşulları laboratuvar ve saha koşullarında büyük önem taşıdığından, Bölüm 4'te polipropilen modifiyeli bitümün hazırlanma koşulları/karıştırma parametreleri incelenmiştir. Bölüm 5 ve 6' da, sırasıyla

polipropilen modifikasyonunun bitümün fiziksel ve reolojik özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bölüm 7'de, polipropilen modifiyeli bitümle hazırlanan asfalt karışımlarının performansını inceleyen çalışmalar değerlendirilmiştir. Bölüm 8'de, polipropilen ile birlikte diğer katkı maddeleri de kullanılarak hazırlanan kompozit modifiye bitümün üretildiği çalışmalar incelenmiştir. Çalışmanın son bölümünde, elde edilen bilgiler ışığında yazarlar tarafından bitüm modifikasyonunda polipropilen kullanımına ilişkin genel yorum ve değerlendirmeler yapılmıştır.

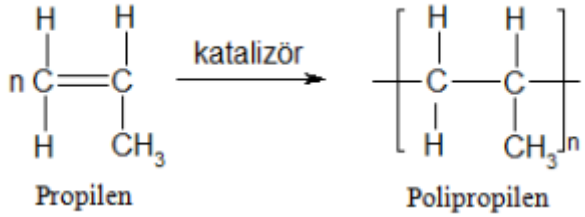
3. PLASTİK VE POLİPROPİLEN

Plastik; karbon (C), hidrojen (H), oksijen (O), azot (N) ve diğer organik ya da inorganik elementlerin oluşturduğu monomer adı verilen; basit yapıdaki molekküllü gruplardaki bağın koparılarak polimer adı verilen uzun ve zincirli bir yapıya dönüştürülmesi ile elde edilen malzemelere verilen isimdir. Plastik kelimesi, "şekillendirilebilen veya kalıplanabilen" anlamına gelen Yunanca πλαστικός (plastikos) ve "kalıplanmış" anlamına gelen πλαστός (plastos) kelimesinden türetilmiştir (Çağatay ve Çobanoğlu, 1997). Plastiklerin; mekanik darbelere karşı dirençli olması, korozyona ve suya tamamen veya kısmen dayanıklı olması, yüksek termal ve elektriksel yalıtım gücüne sahip olması, hafif olması, asit ve bazlara karşı dirençli olması, kolay işlenebilir olması ve sürdürülebilir olması avantajlarındandır. Polimerler işleme şekillerine, başka bir deyişle ısıya ve/veya çözücülere karşı gösterdikleri davranışa göre termoplastikler ve termosetler olarak iki grup altında incelenir (Saçak, 1998). Termoplastikler, lineer polimerler olup sıcaklık artınca yumuşarlar, soğuyunca sertleşirler. Termoset plastikler ise polimerizasyon işleminden sonra sertleşirler ve tekrar yumuşamaları çok zordur. Polipropilen, otomotiv sanayiinde kullanılan parçalardan, tekstil ve yiyecek paketlemesine kadar çok geniş kullanım alanı olan termoplastik bir polimerdir. Monomer propilenin polimer hâle getirilmesi ile elde edilen polipropilen organik solventlere, asit ve bazlara karşı aşırı derecede dirençlidir.

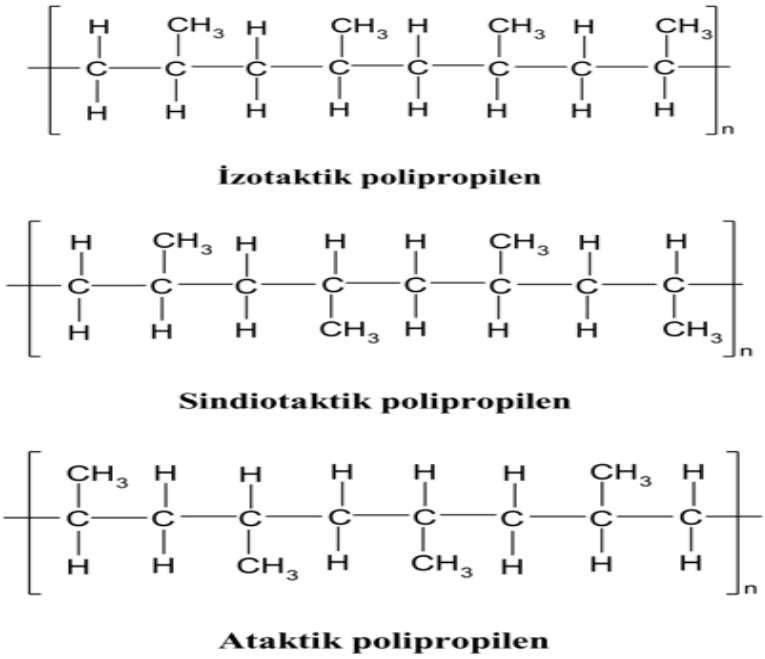
3.1. Polipropilen

(C3H6)n kimyasal formülüne sahip yorulmaya karşı çok dirençli ve iyi bir darbe dayanımına sahip polipropilen monomer propilenin polimer hâle getirilmesi ile elde edilmiştir. 1953 yılında K. Ziegler ve G. Natta tarafından sentezlenen polipropilen mucitlerine 1963 yılında Nobel ödülü kazandırmıştır (Pişkin, 1987). Çekme direnci en yüksek termoplastiklerden olan polipropilenin çekme gerilimi 3,5 kg /mm²dir. Katkı maddeleriyle güçlendirildiğinde çekme gerilimi 112,5 kg/mm²den 386 kg/mm²ye kadar yükseltilebilir (MEGEP, 2013). Polimer

molekülü boyunca birbirine bağlanarak molekülün ana iskeletini oluşturan atomlar dizisine ana zincir denir. Polimerlerin ana zincirindeki atomlara yan grup denilen bazı kimyasal birimler bağlanmıştır. Polipropilende yan grup metil (CH3)dir. Bu yan grupların (-R) bağlanma konumuna bağlı olarak sindiyotaktik, izotaktik ve ataktik polimer yapıları ortaya çıkar (Saçak, 1998).



Şekil 3. Polipropilenin genel polimerleşme tepkimesi(MEGEP, 2013)



Şekil 4. Polipropilende gözlemlenebilecek taktik yapılar (MEGEP, 2013)

İzotaktik polimerlerde, -R yan grupları polimer zinciri boyunca aynı yönde bulunur ve polimer zincirlerinin düzenli bir araya gelmelerine yardım ederek polimerin kristallenme yeteneğini artırır. Sindiyotaktik polimerde -R yan grupları zincirin bir sağında bir solunda (veya bir altında bir üstünde) bulunacak konumda zıt konfigürasyonda sıralanarak polimerin kristallenmeye yatkınlığını artırır. Ataktik polimerde ise -R yan gruplarının zincir boyunca yerleşme geometrilerinde bir düzen yoktur. Bu düzensizlik kristallenmeye eğilimli olmayışı sağlar. Bir polipropilen polimeri yapısında farklı yoğunlukta sindiyotaktik, izotaktik ve ataktik yapıları bulundurur. Bu yoğunluk farkı üretimden üretime, firmadan firmaya değişiklik gösterir. Bu farklılıktan dolayı dünyadaki herhangi bir polipropilen polimerindeki yapı oranları bir başka polipropilen polimerindeki karşılaşılmayabilir. Bu durum ise kullanılan malzemede bir tekdüzelik olmayışına neden olur ve polimerin saflaştırılmasını gerekliliğini doğurur. Saflaştırmanın gerçekleşmesi için polipropilen polimerinin yapısındaki oluşumları (izotaktik, ataktik, sindiotaktik) teke indirmek gerekir. Bu işlem kimyasal çözücüler ile mümkündür. Malzemenin saf olmayışı elde edilen sonuçların evrenselliğine gölge düşürmektedir. Polimer yapılarındaki bu düzen veya düzensizlik (izotaktik, ataktik ve sindiotaktik) malzemenin erime sıcaklığı etkileyen bir parametredir.

Bu yapıların polimerdeki miktar bakımından yoğunluğu o polimerin erime sıcaklığını etkiler. Polimerlerin ısı karşısındaki davranışlarını yapılarındaki amorf ve kristal bölgeler belirler. Polimerler yeterince düşük sıcaklıkta cam gibi sert ve kırılgandır. Polimer ısıtıldığında camsı geçiş sıcaklığı (Tg) denilen bir sıcaklıkta yumuşayarak kauçuk özellikleri gösterir. Isıtılma işlemi sürdürülürse polimer kağuçumsu davranışı da bırakarak zamk görüntüsü üzerinden yeterince yüksek sıcaklıklarda sıvı halini alır. Fakat kauçuğumsu, zamksı ve sıvı davranış değişiklikleri arasında kesin sıcaklık değerleri yoktur, geçişler derecelidir. Çoğu polimer amorf ve kristal bölgeleri birlikte örgülerinde bulundurur (yarı kristal). Polipropilen yarı kristal bir polimer olup camsı geçiş sıcaklıkları altında amorf polimerler gibi kırılgandır. Camsı geçiş sıcaklığı aşıldığında belli derecede yumuşaklık kazanmakla birlikte kristal yapılarından dolayı esnek termoplastik davranış sergilerler. Erime sıcaklığına kadar (Te) termoplastik özelliklerini korurlar ve erime sıcaklığında kristal yapıları yıkılarak viskoz bir sıvı verecek şekilde erirler (Saçak, 1998).Aynı zamanda polimerin iç veya dış parametreler olmadan (sıcaklık, basınç, çözücü vb.) sıvılaştırılması mümkün değildir. Bugün dünyada 150'den fazla polipropilen türü üretilmekte olup fiziksel özellikleri açısından az da olsa birbirinden farklı özellikler gösterir. Polipropilene ait bazı genel fiziksel özellikler şöyledir (MEGEP, 2013):

- Erime sıcaklık aralığı: 160-170 °C

- Erime ısısı: 21 cal/g
- Yoğunluk: 0,90-0,929 g/cm³
- Özgül ısı: 0,46 cal/g°C
- Bozunma sıcaklığı: 380-410 °C
- Nem tutma: %0,1

Polipropilen türlerinden birkaçı aşağıdaki gibidir:

- HIPP: Yüksek izotaktik polipropilen
- FRPP: Fiber takviyeli polipropilen
- PP-g-MAH: Maleik anhitrat aşılı polipropilen

4. MODİFİYE BİTÜMÜN HAZIRLANMA KOŞULLARI

Modifiye bitümün hazırlanma koşulları, kararlı bir bitüm üretilmesi açısından önemlidir. Modifiye bitümün hazırlanması sırasında seçilen karıştırma parametreleri bitümün performansını önemli ölçüde etkilemektedir. Karışım hazırlama parametreleri, bitüme eklenecek katkı maddesi miktarı, mikser tipi, katkı maddesi ile bitümün karıştırılma süresi, karıştırma sıcaklığı ve hızı olarak sıralanabilir. Tablo 1'de verilen karıştırma parametreleri incelendiğinde çalışmalar arasında farklılıklar olduğu görülmektedir. Yapılan çalışmalarda modifiye bitüm üretilirken 115-200 ˚C arasındaki sıcaklıklar ve 10-180 dakika arasındaki karıştırma süreleri kullanıldığı görülmektedir. Çalışmalar incelendiğinde, 180 °C sıcaklık ve 30 dakika karıştırma süresi üzerinde yoğunlaşma vardır. Öte yandan hız parametresi incelendiğinde 120 rpm ile 10000 rpm arasında değişen hızlar görülmekte, ancak yoğunluk 4000 rpm' nin üzerindedir. Bundan yola çıkarak polipropilen modifiye bitüm üretimi için optimum karıştırma parametrelerinin zaman, sıcaklık ve hız için sırasıyla 30 dk, 180 ˚C ve 4000 rpm olarak düşünülebileceği düşünülmektedir. Ayrıca Mazurek vd. (2022) yaptıkları çalışmada; iki plastomer, PP ve PET ve iki bitüm tipi, 20/30 ve 70/100 seçerek optimum modifiye bitüm hazırlama kriterlerini belirlemek için; hem fiziksel hem de reolojik testleri tamamlamışlardır. En iyi sonucu, bitüm 70/100'e 160 ◦C'de yaklaşık 6300 rpm karıştırma hızıyla 105 dakika boyunca %5 ince taneli PP plastomer uygulanarak elde etmişlerdir.

Tablo 1. Polipropilen modifiyeli bitümün hazırlanma koşulları

Plastik Türü	Karıştırıcı Tipi	Karıştırma Parametreleri			Kaynakça
		Zaman (dk)	Sıcaklık (°C)	Hız (rpm)	
DYPE, PP ve PS	-	-	170-180	5000-10000	(Akkouri, Baba, Simou, Elfarissi ve Nounah, 2020)
PP	Yüksek kesmeli karıştırıcı	90	190	3500	(Nasr, Babagoli, Rezaei ve Borujeni, 2022)
PP, EPR ve PE	Çift vidalı sürekli karıştırıcı	20	180	120	(F. Li ve diğerleri, 2023)
DYPE ve PP	Yüksek kesme dönmeli karıştırıcı	60	180	900	(Omairey, Zhang, Artamendi ve Allen, 2021)
PP	Yüksek kesmeli karıştırıcı	50	170	400	(Xu ve diğerleri, 2022)
PE ve PP	-	30	170	1000-1500	(W. Zhang ve diğerleri, 2022)
DYPE, LDYPE, YYPE, PE ve PP	-	120	160-180-200	2000	(Boom, Enfrin, Grist ve Giustozzi, 2022)
PP	-	30	170	500	(Guo, Xu, Zhang, Ji ve Wu, 2022)
YYPE, DYPE ve PP	-	-	120-180	5000	(Alhadidi, Al-Qadi, García Mainieri, Sharma ve Rajagopalan, 2023)
YYPE, DYPE, PP, PET ve PVC	-	60	180	-	(Dalhat, Al-Abdul Wahhab ve Al-Adham, 2019)
PP ve PP	-	-	-	-	(Pallavi, Dey ve Veerendra, 2022)
DYPE, LDYE, YYPE, PE ve PP	-	120	160-180-200	2000	(Boom, Enfrin, Xuan, Grist ve Robert, 2022)
PP, YYPE ve DYPE	-	20-30	160-170	-	(Sathyanarayana ve Manoj, 2021)
PET, PE ve PP	-	-	157	-	(Rangelov, Dylla ve Sivaneswaran, 2021)
PP ve DYPE	-	-	-	-	(Taih, 2011)
PP	-	120	160	1500	(Atasağun, 2021)
DYPE, YYPE, PE ve PP	Manuel	-	160-170	-	(Verma, 2020)

DYPE, YYPE ve PP	Üç bıçaklı karıştırıcı	45	170-180	4000	(Karmakar ve Roy, 2016)
PP	-	-	-	-	(Buruiana, Georgescu, Carp ve Ghisman, 2023)
PE, PP ve YYPE	-	60	180	900	(Vargas ve El Hanandeh, 2023)
PP	Yüksek kesmeli karıştırıcı	90	190	3500	(Nasr ve diğerleri, 2022)
PP	Yüksek hızlı kesmeli karıştırıcı	10	115	800	(Ling, Lu, Zhang, Li ve Oeser, 2019)
YYPE, DYPE, PET ve PP	-	60	180-190	5000	(Dalhat ve Al-Abdul Wahhab, 2017)
PP	-	120	180	600	(Ali, Soudani ve Haddadi, 2022)
PP, PET, YYPE ve DYPE	-	10,15,30 ve 60	150	4500	(Veropalumbo, Russo, Viscione, Biancardo ve Oreto, 2021)
PP, YYPE ve DYPE	-	20-30	160-170	-	(Naveen ve diğerleri, 2022)
PP	Yüksek kesmeli karıştırıcı	-		4000	(Jerin, 2020)
PP ve DYPE	Yüksek kesmeli karıştırıcı	240	180	4000	(Arunthavabalan, 2021)
PP, YYPE, DYPE ve PB	-	60	180-190	5000	(Dalhat, 2017)
PP ve PET	-	30-180	160-180	120/9500	(Mazurek, Šrámek ve Buczyński, 2022)
PP, YYPE ve DYPE	Yüksek kesmeli karıştırıcı	120	180	4500	(F. Zhang ve Hu, 2016)
PP ve PE	Yüksek kesmeli karıştırıcı	30	170	3000	(H. Li ve diğerleri, 2022)
PP, YYPE ve DYPE	Yüksek kesmeli karıştırıcı	60	160	5000	(Al-Abdul Wahhab, Dalhat ve Habib, 2017)
PP ve YYPE	Yüksek kesmeli karıştırıcı	30-60	160-170	120	(Appiah, Berko-Boateng ve Tagbor, 2017)
PP ve PE	-	40	170	-	(J. Li ve diğerleri, 2022)
PP	Yüksek hızlı karıştırıcı	30	175	4500	(Liu, Hao, Sun, Li ve Wang, 2022)
PP, YYPE, DYPE ve PS	Yüksek hızlı karıştırıcı	15	160	4000	(Ma, Nawarathna ve Hesp, 2022)

5. FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİ

Bitümün fiziksel özellikleri arasında penetrasyon, yumuşama noktası ve süneklik bulunur. Penetrasyon ve yumuşama noktası değerleri bitümün sertlik-yumuşaklığı hakkında bilgi verirken, süneklik değeri bitümün uzayabilirliğini temsil eder. Geleneksel bitüm testleri ile belirlenen bu özellikler kesin bilgilerden ziyade bitümün performansı hakkında fikir verir. Örneğin, düşük penetrasyon değerine ve yüksek yumuşama noktasına sahip bitümün üstün yüksek sıcaklık performansına sahip olması beklenir. Yüksek sünekliğe sahip bitümün termal çatlamaya karşı yüksek dirence sahip olması beklenir. Polipropilenin bitümün fiziksel özellikleri üzerindeki etkisini incelemek için, bu çalışmanın makale havuzunda geleneksel testleri içeren çalışmalar Tablo 2'de listelenmiştir. Bu tablo, çalışmalarda kullanılan temel bitüm sınıfı ve katkı maddesi oranını dikkate alarak polipropilenin etkisini göstermektedir. Her bir çalışma incelenerek, Polipropilenin bitümün penetrasyonu, yumuşama noktası ve sünekliği üzerindeki etkisi sırasıyla artış ve azalış için yukarı ve aşağı oklarla gösterilmiştir. Bu fiziksel özelliklerden herhangi biri incelenmemişse, "-" işareti bunu gösterir. Son olarak, geleneksel testlerden elde edilen bulgular kısaca sunulmuştur. Tablo 2 incelendiğinde, verilen tüm çalışmalarda, polipropilen bitümün penetrasyon ve yumuşama noktası değerinde sırasıyla bir azalmaya ve bir artışa neden olduğu görülmektedir. Bu sonuçlar, polipropilenin bitümün kıvamını artırdığını, yani polipropilenle modifiye edilmiş bitümün yüksek sıcaklıklarda yüksek deformasyon direncine sahip olabileceğini göstermektedir. Öte yandan, polipropilen ilavesi bitümün sünekliğini olumsuz yönde etkilemiştir. Bu nedenle, polipropilen modifikasyonu bitümün termal çatlamaya karşı direncini azaltabilir.

Tablo 2. Polipropilen modifikasyonunun saf bitümün fiziksel özellikleri üzerindeki etkisi

No	Saf Bitüm	Plastik		Polipropilenin etkisi			Sonuç	Kaynakça
		Türü	Oran (%)	Pen.	Y.N.	Dük.		
1	B35/50	PP	5	↓	↑	-	Penetrasyonun azaldığı, yumuşama noktasının arttığı belirtilmiştir.	(Ali ve diğerleri, 2022)
2	C320	PP	5, 7	↓	↑	-	Penetrasyonun azaldığı, yumuşama noktasının arttığı belirtilmiştir.	(Vargas ve El Hanandeh, 2023)
3	B60/80	HIPP, FRPP	4,6,8	↓	↑	-	Penetrasyonun azaldığı, yumuşama noktasının arttığı belirtilmiştir.	(F. Li ve diğerleri, 2023)
4	SK-90#	PP	2,4,6,8,10,12	↓	↑	↓	Modifiye bitümün saf bitüme göre daha yüksek PI ve eşdeğer yumuşama noktasına sahip olduğu belirlenmiştir.	(H. Li ve diğerleri, 2022)
5	AC-20	PP	0.5,1,1.5,2,2.5,3	↓	↑	-	Bitümün sertleşmesi, malzemenin sertliğini ve dolayısıyla yapının yük yayma kabiliyetlerini artırdığı için faydalı olabilir ancak aynı zamanda aşınmaya veya çatlamaya da yol açabilir.	(Appiah ve diğerleri, 2017)
6	AH-70	PP	5	↓	↑	-	Modifiye asfaltların yumuşama noktası artmış, penetrasyon azalmış ve süneklik değişimi belirgin olmamıştır. Bunun nedeni plastik makromolekülün asfalt moleküler hareketini sınırlayarak asfaltın deformasyon direncini ve yüksek sıcaklık kararlılığını iyileştirdiği olarak belirtilmiştir.	(J. Li ve diğerleri, 2022)
7	B35/50	PP	5, 6, 7	↓	↑	-	PI değeri polipropilen eklenmesiyle artsa da hala saf bitüm PI aralığında olduğu belirtilmiştir.	(Akkouri ve diğerleri, 2020)
8	Ulaşılamadı	PP	2, 4, 6, 8	↓	↑	↓	Sıcak ve aşırı nemli iklimlerde polipropilen modifiyeli asfalt karışımların kullanılabileceği belirtilmiştir.	(Nemada ve Thorat, 2013)
9	B60/70	PP	1, 2, 3	↓	↑	↓	Polimer biyolojik olarak parçalanmayan bir madde olduğundan, başlangıçta bağlayıcıdaki varlığı, modifiye bitümün penetrasyonunu azaltır. Yine de, zamana bağlı sertleşme sürecini geciktirme potansiyeline sahiptir denilmiştir.	(Jerin, 2020)
10	Pen 70	PP-g-MAH	2, 4, 6, 8, 10	↓	↑	↓	PP-g-MAH dozajı %8 kadar literatüre uygun örnek verirken %8 üzerine çıkınca hidroksil grupları (RPP, RPE ve asfalttan) ve maleik anhidrit grupları (PP-g-MAH'dan) arasında kimyasal reaksiyonlar tamamlamış olması olarak belirtilmiştir.	(W. Zhang ve diğerleri, 2022)

Pen: Penetrasyon; Y. N: Yumuşama Noktası; Dük: Düktilite; PP:Polipropilen; HIPP: Yüksek İzotaktik Polipropilen; PP-g-MAH: Maleik Anhitrat Aşılı Polipropilen; FRPP: Fiber Takviyeli Polipropilen

6. POLİPROPİLENİN REOLOJİK ÖZELLİKLER ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

6.1. Polipropilenin işlenebilirlik üzerindeki etkisi

Genel olarak, bitümün viskozitesi kıvamdaki artışla paralel olarak artar. Dönme viskozitesi (RV) testlerinden elde edilen değerler genellikle bitümün viskozitesinin bir ölçüsü olarak kullanılır. Ölçülen viskozite değerleri bitümün işlenebilirliği hakkında bir fikir verir. Yol kaplamasının inşası için bitümün yeterli işlenebilirliğe sahip olması gerekir. Bu nedenle, Superpave spesifikasyonu (ASTM-D6373-15, 2015) 135 °C'de ölçülen bitümün viskozite değerlerinin 3000 Pa' yı geçmemesi gerektiğini belirtir. Polipropilenin bitümün işlenebilirliği üzerindeki etkisini değerlendirmek için, bu çalışmanın makale havuzunda RV testini içeren çalışmalar incelendi. Bu çalışmalarda ortak olarak, polipropilenin bitümün viskozitesini artırdığı belirtilmiştir (Atasağun, 2021, 2023; Dalhat, 2017; Ling ve diğerleri, 2019; Nasr, Babagoli ve M., 2019; Nasr ve diğerleri, 2022; W. Zhang ve diğerleri, 2022). Bu bulgular, bir önceki bölümde bahsedilen polipropilenin bitümün kıvamı üzerindeki sertleştirici etkisiyle uyumludur. Bitümün viskozitesinin artırılması, bitümün karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarını artırarak işlenebilirliğini olumsuz yönde etkiler. Bu nedenle, polipropilen eklenmesi bitümün işlenebilirliğini azaltabilir ve yol inşaatı için gereken enerji ve karbon emisyonlarını artırabilir.

6.2. Polipropilenin tekerlek izi, yorulma ve düşük sıcaklık performansına etkisi

Bitümün yüksek sıcaklıklarda tekerlek izi oluşumuna karşı direncini belirlemek amacıyla kullanılan en yaygın testlerden biri dinamik kesme reometresi (DSR) testidir. Yüksek sıcaklıklarda yapılan DSR testleri sonucunda bu değerlerden kompleks kesme modülü (G*), faz açısı (δ) ve G*/sinδ parametresi olarak da bilinen tekerlek izi oluşumu parametresi belirlenir (Oruç ve Yılmaz, 2016). Tekerlek izi oluşumu parametresindeki artış tekerlek izi oluşumuna karşı direncin de arttığını göstermektedir. Polipropilen ile modifiye edilmiş bitümün tekerlek izi oluşumuna karşı direncini ve diğer reolojik özelliklerini inceleyen çalışmalar Tablo 3'te verilmiştir. Bu çalışmalarda elde edilen sonuçları sayısal olarak vermek mümkün olmadığından her çalışmada incelenen parametreler tabloda işaretlenmiştir. Tabloda verilen referanslarda elde edilen tekerlek izi oluşumu parametrelerine bakıldığında ise polipropilen modifikasyonu ile G*/sinδ değerinde önemli bir artış olduğu görülmüştür. Bu sonuç polipropilen ile modifiye edilmiş bitümün tekerlek izi oluşumuna karşı direncinin yüksek olacağını göstermektedir.

PP modifiyeli asfaltlarda kalın filamentlere ve büyük gözeneklere sahip süngerimsi polimer ağı bitümün tekerlek izi oluşumuna karşı direncinin yüksek olmasının nedeni olarak gösterilebilir (Ma ve diğerleri, 2022). Bitümün tekerlek izi performansını incelemek için kullanılan bir diğer yöntem ise çoklu gerilimli sürünme ve toparlanma (MSCR) testidir. DSR testinden daha güncel olan bu test ile modifiye bitümün stres altındaki cevabı iki parametre üzerinden değerlendirilir: geri kazanılamayan sürünme uyumluluğu (Jnr) ve yüzde toparlanma (%R). Tablo 3'te verilen MSCR testini de içeren çalışmalar incelendiğinde bitümün Jnr değerinin azaldığı görülmektedir. Buna karşılık %R değeri genellikle polipropilen ilavesiyle artmaktadır. Bu sonuçlar polipropilen ilavesiyle bitümün elastikiyetinin arttığını ve tekerlek izi direncinin iyileştiğini göstermektedir. Bitümün bir diğer reolojik özelliği ise ara servis sıcaklıklarında yorulmaya karşı direncidir. DSR testinden elde edilen G*sinδ parametresi sıklıkla bu direncin ölçüsü olarak alınmaktadır. Yorulma parametresi olarak da bilinen bu parametrenin küçük olması arzu edilir. Parametre arttıkça yorulma çatlaklarına karşı direnç azalmaktadır. Polipropilenin yorulma direncine olan etkisi incelendiğinde, (Omairey ve diğerleri, 2021) PP modifiyeli bitüm daha düşük bir yorulma direncini gösterdiğini, bitüme PP eklenmesinin, çatlak oluşumu yoluyla daha düşük bir enerji dağılımına yol açtığı için yorulma çatlama direncini iyileştirdiğini göstermiştir. Genellikle, plastik uzatıcıların eklenmesiyle yorulma direncinde bir iyileşme olur. Bitümün bir diğer reolojik özelliği de düşük sıcaklıklarda çatlamaya karşı direncidir. Bükme kiriş reometresi (BBR) testi, bitümün düşük sıcaklıktaki çatlamaya karşı direncini belirlemek için sıklıkla kullanılır. Basınç yaşlandırma kabı (PAV) yöntemi ile yaşlandırılan bitüm numunesine uygulanan bu test sonucunda iki parametre elde edilir: sürünme sertliği (S) ve m değeri. Bitümün S değerindeki azalma ve m değerindeki artış, düşük sıcaklık performansının iyileştiğini gösterir. Polipropilen modifiyeli bitümün S ve m parametrelerini inceleyen çalışmalar Tablo 3'te verilmiştir. Bu çalışmalarda elde edilen bulgular incelendiğinde, polipropilenin düşük sıcaklık performansına etkisine ilişkin kesin bir eğilim olmadığı belirlenmiştir (J. Li ve diğerleri, 2022; W. Zhang ve diğerleri, 2022). Genel olarak, polipropilenin olumlu veya olumsuz etkisi ihmal edilebilir düzeydedir. Bu sonuçlardan, polipropilenin bitümün düşük sıcaklık performansına etkisinin, homojen dağılımına ve kullanılan polipropilenin türüne, polimer yapısına ve boyutuna bağlı olduğu söylenebilir.

Tablo 3. Polipropilen modifikasyonunun saf bitümün reolojik özellikleri üzerindeki etkisi

No	Saf Bitüm	Polipropilen		Reolojik Etki								Kaynakça
		Tür	Oran	G*	δ	G*/sinδ	G*sinδ	S(t)	m-değeri	MSCR	Diğer	
1	Bilinmiyor	PP	2, 4, 6	✓	✓	✓						(Habib, 2015)
2	B40/100	PP	5, 7, 10, 12	✓	✓	✓				✓		(Omairey ve diğerleri, 2021)
3	B60/80	PP, HIPP, FRPP	4, 6, 8	✓	✓					✓		(F. Li ve diğerleri, 2023)
4	B50/70 B70/100	PP	2, 3, 4, 5							✓		(Mazurek ve diğerleri, 2022)
5	B60/80	PP	5	✓	✓	✓		✓	✓			(J. Li ve diğerleri, 2022)
6	B60/80	PP	4	✓	✓	✓				✓	LAS	(Liu ve diğerleri, 2022)
7	PG64-22	PP	4	✓	✓	✓						(Dalhat ve Al-Abdul Wahhab, 2017)
8	PG64-22	PP	2, 3.5, 4, 5, 15	✓	✓	✓				✓		(Alhadidi ve diğerleri, 2023)
9	AC-20	PP-g-MAH	1, 3, 5, 7, 9	✓	✓	✓	✓	✓	✓			(W. Zhang ve diğerleri, 2022)

7.ASFALT KARIŞIMLARININ PERFORMANSI ÜZERİNDEKİ POLİPROPİLEN MODİFİKASYONUNUN ETKİSİ

Bitümlü kaplamaların trafik ve çevre koşullarındaki deformasyonlara karşı performansı, bitümlü karışımlara çeşitli testler uygulanarak öngörülebilir. Marshall kararlılık ve akma testi, tekerlek izi testi ve yarı dairesel eğilme (SCB) testi bu bağlamda yaygın olarak kullanılan testlerdir. Literatürde polipropilenle modifiye edilmiş bitümle hazırlanan karışımlarla ilgili çalışma sayısı sınırlı olmakla birlikte belirtilen testleri içeren çalışmalar mevcuttur (Dalhat ve diğerleri, 2019; Jerin, 2020; Ma ve diğerleri, 2022). Polipropilen ile modifiye edilmiş bitümlerle hazırlanan asfalt karışımlarına Marshall kararlılık ve akma testinin uygulandığı çalışmalardan elde edilen sonuçlar tutarlıdır. Bu çalışmalarda (Dalhat ve diğerleri, 2019; Jerin, 2020) polipropilen içeren karışımların kararlılık değerlerinin daha yüksek, akış değerlerinin ise baz bitümle hazırlanan kontrol karışımlarına göre daha düşük olduğu belirlenmiştir. Bu sonuçlar, polipropilen ile modifiye edilmiş bitümle inşa edilen kaplamaların, baz bitümle hazırlanan kaplamalara göre daha iyi tekerlek izi direncine sahip olacağını göstermektedir. Polipropilen modifikasyonunun bitümlü karışımların tekerlek izi direncine etkisini ince-

leyen çalışmaların sonuçları birbiriyle örtüşmektedir. Bu sonuçlar, asfalt karışımlarının deformasyon direncinin polipropilen modifikasyonu ile iyileştirildiğini göstermektedir. Polipropilenin bitümlü karışımların çatlama direncine etkisinin SCB testi ile araştırıldığı çalışmalarda çoğunlukla benzer sonuçlar elde edilmiştir. Ma vd. (2022) polipropilen eklenmesinin düşük sıcaklıklarda bitümlü karışımların çatlak tokluğunu iyileştirdiğini belirlemiştir. Bu sonuçlardan, polipropilenin bitümlü karışımların düşük sıcaklık performansına etkisinin genel olarak olumlu olduğu söylenebilir. Yine de bu konuda daha fazla çalışmaya ihtiyaç vardır.

8. KOMPOZİT MODİFİKASYONUNDA POLİPROİLEN KULLANIMI

Kompozit modifikasyonlar, bitümün birden fazla katkı maddesi ile modifiye edildiği modifikasyonlardır. Bu modifikasyonların temel amacı, farklı katkı maddelerinin özelliklerini kullanarak bitümün davranışını birçok yönden iyileştirmektir. Polipropilenin bitüm modifikasyonlarında kullanımı yaygınlaştıkça, kompozit modifikasyonda polipropilen kullanımı da artmıştır. Kompozit modifikasyonlarda polipropilenin kullanıldığı çalışmalar ve bu çalışmalarda polipropilenle birlikte kullanılan katkı maddeleri Tablo 4'te verilmiştir. Bu tablodan görülebileceği gibi, polipropilenin bitüm üzerindeki etkisi genellikle kauçuk tozu ile birlikte incelenmektedir. Bu çalışmalar, polipropilenin kauçuk modifiyeli bitümün yüksek sıcaklık performansını iyileştirdiğini göstermektedir. Tablo 4'te polipropilen ile birlikte yaygın olarak kullanılan bir diğer katkı maddesinin PE olduğu görülmektedir. Bu sonuç, PE' nin bitüm modifikasyonunda en yaygın katkı maddelerinden biri olmasının doğal bir sonucudur. Bu çalışmalarda, polipropilenin PE modifiyeli bitümün elastik özelliklerini ve tekerlek izi direncini daha da iyileştirdiği belirlenmiştir. Bu sonuçlardan, polipropilenin kompozit modifikasyonlarda kullanıldığı çalışmalarda özellikle tekerlek izi direnci üzerinde olumlu etkilerinin olduğu görülmektedir. Bu nedenle bitümün bazı özelliklerini iyileştirirken, tekerlek izi direncine olumsuz etki eden katkı maddelerinin polipropilen ile birlikte kullanılmasının, bitümün yüksek sıcaklık performansı açısından daha iyi olacağı düşünülmektedir.

Tablo 4. Bitüm modifikasyonunda polipropilenle birlikte kullanılan katkı maddeleri

Kompozit Katkı Maddesi	**Kaynakça**
DYPE+YYPE +PP+SBS	(Dalhat ve diğerleri, 2019; Habib, 2015)
Kauçuk tozu	(Ali ve diğerleri, 2022; Ling ve diğerleri, 2019; Nasr ve diğerleri, 2019, 2022; F. Zhang ve Hu, 2016)
YYPE+DYPE	(Karmakar ve Roy, 2016; Naveen ve diğerleri, 2022; Sathyanarayana ve Manoj, 2021; Veropalumbo ve diğerleri, 2021)
PE	(F. Li ve diğerleri, 2023; H. Li ve diğerleri, 2022; J. Li ve diğerleri, 2022; Vargas ve El Hanandeh, 2023)
SBS	(Al-Abdul Wahhab ve diğerleri, 2017; Guo ve diğerleri, 2022)
YYPE	(Dalhat ve Al-Abdul Wahhab, 2016)
PE+PET	(Rangelov ve diğerleri, 2021)
Çınar yaprakları	(Atasağun, 2021)
PET+Kağıt yaprakları	(Atasağun, 2023)
YYPE+DYPE +Lignin	(Verma, 2020)
PE+PS	(Paunikar, More ve Tapre, 2022)

9. SONUÇLAR

Bu derlemede, bitüm modifikasyonunda polipropilen ve türevlerinin kullanımı ve bitümün fiziksel ve reolojik özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu bağlamda literatürdeki çalışmalar detaylı olarak incelenmiş ve bu çalışmalardan elde edilen bulgular karşılaştırılarak bir değerlendirme yapılmıştır. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda listelenmiştir.

• Polipropilen modifikasyonu bitümün penetrasyon değerinde azalmaya ve yumuşama noktasında artışa neden olmuştur. Diğer yandan, polipropilen ilavesi bitümün sünekliği üzerinde olumsuz bir etkiye sahip olmuştur.

• Polipropilenin bitümün tekerlek izi direncine etkisi değerlendirildiğinde hem DSR hem de MSCR testlerinden elde edilen parametreler, polipropilen modifikasyonunun arttırıcı etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

• Polipropilenin bitümün yorulma performansına etkisi değerlendirildiğinde, gözle görülür bir eğilim görülmemiştir.

• Polipropilenin bitümün düşük sıcaklık performansına etkisi değerlendirildiğinde, modifiye edilmiş bitümün hazırlama koşullarına, kullanılan polipropilen türüne, katkı oranına, boyuta ve saflığına bağlı olarak olumlu veya olumsuz bir etkinin gözlendiği belirlenmiştir.

• Polipropilenin bitümlü karışımların performansına etkisi incelendiğinde, polipropilen karışımının kontrol karışımlarına göre daha yüksek kararlılık, daha az akış değeri ve daha az tekerlek izi derinliği gösterdiği belirlenmiştir. Öte yandan, polipropilen genel olarak düşük ve orta sıcaklıklarda bitümlü karışımların çatlak direncini iyileştirmiştir, ancak daha fazla araştırmaya ihtiyaç vardır.

Bu çalışmadan elde edilen bilgiler ışığında, polipropilen ve türevlerinin bitüm ve bitümlü karışımların tekerlek izi direncini önemli ölçüde iyileştirdiği belirlenmiştir. Bu nedenle, yüksek sıcaklıklara maruz kalan sıcak iklimlerde yapılacak kaldırımlarda polipropilen modifiyeli bitüm kullanılmasının faydalı olacağı düşünülmektedir. İleriki çalışmalarda araştırmacıların, polipropilen ve türevlerinin düşük ve orta sıcaklıklarda bitümün çatlama direnci üzerindeki etkilerini, polipropilen tipi, boyutu, katkı oranı, saflaştırılması ve farklı karıştırma prosedürleri dahil olmak üzere inceleyerek literatüre katkıda bulunacaklarına inanılmaktadır. Dahası polipropilenin saflaştırılması ile hem bitüme katılarak homojen bir karışım elde edilebilir hem de saflaştırmadan sonra elde edilecek bulgular global olacaktır. Polimer modifiyeli karışımlardaki en büyük sıkıntı kullanılan polimerin yapısında barındırdığı yapılardır. Bu yapılar polimerin fiziksel özelliklerini belirlediği için yapılan çalışmalar yerel kalmaktadır. Saflaştırma yapılarak polimerin yapısındaki oluşum şekli indirgenebilirse saflaştırma sonrası elde edilecek bulgular tüm dünya da geçerli olacaktır. Ayrıca, polipropilenin bitümlü karışımların özellikleri üzerindeki etkisini inceleyen sınırlı sayıda çalışma olduğundan, çeşitli deneysel yöntemlerle polipropilen ve türevlerinin bitümlü karışımların performansı üzerindeki etkisinin araştırılmasının literatürdeki boşluğu dolduracağı düşünülmektedir. Aynı zamanda polipropilenin yapısındaki kristal bölgeden dolayı tam erimemesi de homojen bir karışım elde edememe sebep olmaktadır.

KAYNAKÇA

Akkouri, N., Baba, K., Simou, S., Elfarissi, L. ve Nounah, A. (2020). Recycled thermoplastics modified bitumen improved with thermoplastic elastomer. *E3S Web of Conferences* içinde (C. 150, ss. 3–7). doi:10.1051/e3sconf/202015002015

Al-Abdul Wahhab, H. I., Dalhat, M. A. ve Habib, M. A. (2017). Storage stability and high-temperature performance of asphalt binder modified with recycled plastic. *Road Materials and Pavement Design*, *18*(5), 1117–1134. doi:10.1080/14680629.2016.1207554

Alhadidi, Y. I., Al-Qadi, I. L., García Mainieri, J. J., Sharma, B. K. ve Rajagopalan, N. (2023). Stability of Repurposed Plastics in Asphalt Binder. *Airfield and Highway Pavements*, (June), 60–70.

Ali, B. F., Soudani, K. ve Haddadi, S. (2022). Effect of waste plastic and crumb rubber on the thermal oxidative aging of modified bitumen. *Road Materials and Pavement Design*, *23*(1), 222–233. doi:10.1080/14680629.2020.1820893

Appiah, J. K., Berko-Boateng, V. N. ve Tagbor, T. A. (2017). Use of waste plastic materials for road construction in Ghana. *Case Studies in Construction Materials*, *6*(June 2017), 1–7. doi:10.1016/j.cscm.2016.11.001

Arunthavabalan, S. (2021). *Incorporating Recycled Plastics in Asphalt Binders and Mixtures*. http://hdl.handle.net/11714/8096 adresinden erişildi.

ASTM-D6373-15. (2015). ASTM-D6373-15. *Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder, ASTM Inter*(West Conshohocken), PA. doi:10.1520/C1709-18.

Atasağun, N. (2021). Effect of pyrolysis char produced from co-pyrolysis of waste sycamore leaves and plastic cups on bitumen viscosity and high temperature performance grade. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, *36*(3), 1703–1714. doi:10.17341/gazimmfd.843014

Atasağun, N. (2023). High-Temperature Rheological Properties and Storage Stability of Bitumen Modified with the Char Produced from Co-Pyrolysis of Different Wastes. *Sustainability (Switzerland)*, *15*(10), 8119. doi:10.3390/su15108119

Boom, Y. J., Enfrin, M., Grist, S. ve Giustozzi, F. (2022). Recycled plastic modified bitumen: Evaluation of VOCs and PAHs from laboratory generated fumes. *Science of the Total Environment*, *832*(January), 155037. doi:10.1016/j.scitotenv.2022.155037

Boom, Y. J., Enfrin, M., Xuan, D. L., Grist, S. ve Robert, D. (2022). Laboratory evaluation of PAH and VOC emission from plastic-modified asphalt. *Journal of Cleaner Production*, *377*(June), 134489. doi:10.1016/j.jclepro.2022.134489

Bozdemir, M. G., Oruc, Ş. ve Yesilcicek, H. (2023). Physical and Microstructural Properties of New Boron Resin Compound Synthesized Asphalt. *Journal of*

Materials in Civil Engineering, *35*(2), 04022426. doi:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004611/ASSET/4F2B53D1-5DC8-4E98-AE32-F4AF7730CBD9/ASSETS/IMAGES/LARGE/FIGURE18.JPG

Buruiana, D. L., Georgescu, P. L., Carp, G. B. ve Ghisman, V. (2023). Recycling micro polypropylene in modified hot asphalt mixture. *Scientific Reports*, *13*(1), 1–9. doi:10.1038/s41598-023-30857-9

Çağatay, G. ve Çobanoğlu, Z. (1997). *Plastikler*. Sağlık Projesi Genel Koordinatörlüğü'.

Dalhat, M. A. (2017). *Fatigue and Rutting Performance of Hybrid Recycled Plastic Asphalt Concrete*. *Ph.D. Thesis*. King Fahd University of Petroleum&Minerals.

Dalhat, M. A. ve Al-Abdul Wahhab, H. I. (2016). Cement-less and asphalt-less concrete bounded by recycled plastic. *Construction and Building Materials*, *119*(30 August 2016), 206–214. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.05.010

Dalhat, M. A. ve Al-Abdul Wahhab, H. I. (2017). Performance of recycled plastic waste modified asphalt binder in Saudi Arabia. *International Journal of Pavement Engineering*, *18*(4), 349–357. doi:10.1080/10298436.2015.1088150

Dalhat, M. A., Al-Abdul Wahhab, H. I. ve Al-Adham, K. (2019). Recycled Plastic Waste Asphalt Concrete via Mineral Aggregate Substitution and Binder Modification. *Journal of Materials in Civil Engineering*, *31*(8), 1–10. doi:10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002744

Guo, L., Xu, W., Zhang, Y., Ji, W. ve Wu, S. (2022). Selecting the Best Performing Modified Asphalt Based on Rheological Properties and Microscopic Analysis of RPP/SBS Modified Asphalt. *Materials*, *15*(23). doi:10.3390/ma15238616

Habib, A. (2015). *Eco-friendly Modification of Gulf Asphalt by Using Recycled Plastic Waste*. King Fahd Unıversıtyof Petroleum%Minerals.

İnkaya, N. (2016). *Atık Plastiklerin Karayolunda Kullanımı*. Süleyman Demirel Üniversitesi.

Isacsson, U. ve Lu, X. (1999). Characterization of bitumens modified with SEBS, EVA and EBA polymers. *Journal of Materials Science*, *34*(15), 3737–3745. doi:10.1023/A:1004636329521

Jerin, T. (2020). *Experimental Evaluation of Hot Mix Asphalt Modified with Different Additives*. Military Institute of Science and Tecnology.

Karmakar, S. ve Roy, T. K. (2016). Effect of Waste Plastic and Waste Tires Ash on Mechanical Behavior of Bitumen. *Journal of Materials in Civil Engineering*, *28*(6), 1–9. doi:10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001484

Li, F., Zhang, X., Zhang, K., Li, F., Wang, L. ve Cao, J. (2023). Exploring the Effect of Different Waste Polypropylene Matrix Composites on Service Performance of Modified Asphalt Using Analytic Hierarchy Process. *SSRN*.

Li, H., Zhou, L., Sun, J., Wang, S., Zhang, M., Hu, Y. ve Temitope, A. A. (2022). Analysis of the Influence of Production Method, Plastic Content on the Basic Performance of Waste Plastic Modified Asphalt. *Polymers*, *14*(20), 1–19. doi:10.3390/polym14204350

Li, J., Jia, S., Yang, D., Li, X., Li, D., Ye, X., … Zhao, Y. (2022). Reutilization of crystalline waste plastics for modified asphalt using twin-screw extrusion: Polyethylene and polypropylene as typical subjects. *Journal of Applied Polymer Science*, *139*(30), 1–11. doi:10.1002/app.52690

Ling, T., Lu, Y., Zhang, Z., Li, C. ve Oeser, M. (2019). Value-added application of waste rubber and waste plastic in asphalt binder as a multifunctional additive. *Materials*, *12*(8), 16–19. doi:10.3390/ma12081280

Liu, J., Hao, P., Sun, B., Li, Y. ve Wang, Y. (2022). Rheological Properties and Mechanism of Asphalt Modified with Polypropylene and Graphene and Carbon Black Composites. *Journal of Materials in Civil Engineering*, *34*(12), 1–16. doi:10.1061/(asce)mt.1943-5533.0004513

Ma, J., Nawarathna, H. M. C. ve Hesp, S. A. M. (2022). On the sustainable use of recycled plastics in flexible asphalt pavements. *Journal of Cleaner Production*, *359*(April), 132081. doi:10.1016/j.jclepro.2022.132081

Mazurek, G., Šrámek, J. ve Buczyński, P. (2022). Composition Optimisation of Selected Waste Polymer-Modified Bitumen. *Materials*, *15*(24), 1–23. doi:10.3390/ma15248714

MEGEP. (2013). *Propilen Türevleri Ve Prosesleri*.

Munera, J. C. ve Ossa, E. A. (2014). Polymer modified bitumen: Optimization and selection. *Materials and Design*, *62*(14 May), 91–97. doi:10.1016/j.matdes.2014.05.009

Nasr, D., Babagoli, R. ve M., R. (2019). Evaluating the effects of waste CR-PP combinations on the properties of asphalt binder and mixture in comparion to a commercial. *SSRN*, *3*(3), 17–23.

Nasr, D., Babagoli, R., Rezaei, M. ve Borujeni, P. R. (2022). Evaluating the substitution potential of SBS with crumb rubber-polypropylene blends as asphalt binder and mixture modifiers. *Construction and Building Materials*, *359*(September), 129503. doi:10.1016/j.conbuildmat.2022.129503

Naveen, L., Kumar, M. B., Kumar, P. S., Sravanı, N., Rakesh, U., Akhıl, J. ve Teja, M. D. (2022). Study on Usage of Waste Plastic in Bitumen Mixes in Cold Climate Areas. *Journal of Engineering Sciences*, *13*(07), 1710–1715.

Nemada, S. N. ve Thorat, P. V. (2013). Utilization of Polymer Waste for Modification of Bitumen in Road Construction. *Sci. Revs. Chem. Commun*, *3*(4), 198–213.

Omairey, E., Zhang, Y., Artamendi, I. ve Allen, B. (2021). Deriving and Characterising Alternative Bitumen from Waste Plastics. *7th E&E Congress* içinde (ss. 1–20).

Oruç, Ş. ve Yılmaz, B. (2016). Improvement in performance properties of asphalt using a novel boron-containing additive. *Construction and Building Materials*, *123*, 207–213. doi:10.1016/J.CONBUILDMAT.2016.07.003

Pagev. (2023). *Türkiye Plastik Sektör İzleme Raporu 2023/3*.

Pallavi, M. L., Dey, S. ve Veerendra, G. T. N. (2022). Applications of plastic waste materials in bituminous mixes pavement for increasing the strengthen of pavement materials. *Research Square*, (12 September), 1–42.

Paunikar, V. K., More, P. E. ve Tapre, R. W. (2022). Utilization of Waste Plastic and Rubber For Commercial Purpose. *International Journal of Scientific Research in Science and Technology*, *9*(2), 402–409. doi:10.32628/ijsrst229264

Pérez-Lepe, A., Martínez-Boza, F. J., Gallegos, C., González, O., Muñoz, M. E. ve Santamaría, A. (2003). Influence of the processing conditions on the rheological behaviour of polymer-modified bitumen. *Fuel*, *82*(11), 1339–1348. doi:10.1016/S0016-2361(03)00065-6

Pişkin, E. (1987). *Polimer Teknolojisine Giriş*.

Porto, T. R., Lucena, A. E. F. L., Moraes, T. M. R. P., Neto, O. M. M., Costa, D. B., Carvalho, F. S. S. ve Torres, P. R. B. (2023). The use of iron oxide in asphalt mixtures to reduce the effects of urban heat islands. *Case Studies in Construction Materials*, *18*, e01709. doi:10.1016/J.CSCM.2022.E01709

Rangelov, M., Dylla, H. ve Sivaneswaran, N. (2021). Life-cycle assessment of asphalt pavements with recycled post-consumer polyethylene. *Transportation Research Record*, *2675*(12), 1393–1407. doi:10.1177/03611981211033862

Saçak, M. (1998). *Polimer Kimyasına Giriş*. *A.Ü.F.F. Döner Sermaye i ş letmesi Yay ı nlar ı*.

Sathyanarayana, B. ve Manoj, B. (2021). A Study on Use of Waste Plastic Materials in Flexible Pavements. *Turkish Online Journal of Qualitative Inquiry (TOJQI)*, *12*(4), 108–114. doi:10.15680/ijirset.2015.0408031

Taih, S. A. (2011). The effect of additives in hot asphalt mixtures. *Journal of Engineering and Sustainable Development*, *15*(3), 132–151.

TÜİK. (y.y.). TÜİK Kurumsal. 7 Kasım 2024 tarihinde https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Atik-Istatistikleri-2022-49570 adresinden erişildi.

Vargas, C. ve El Hanandeh, A. (2023). The Utilisation of Polyethylene Waste Pyrolytic Wax as an Additive to Enhance the Performance of Virgin and Polypropylene-Modified Bitumen. *International Journal of Pavement*

Research and Technology, *17*(0123456789), 929–951. doi:10.1007/s42947-023-00278-y

Verma, S. (2020). *Use of Modified Bitumen By Lignin and Waste Plastic in Bituminous Concrete*. *Turkish Journal of Computer and Mathematics Education (TURCOMAT)*. Babu Banarası Das University Lucknow.

Veropalumbo, R., Russo, F., Viscione, N., Biancardo, S. A. ve Oreto, C. (2021). Investigating the rheological properties of hot bituminous mastics made up using plastic waste materials as filler. *Construction and Building Materials*, *270*(February), 121394. doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.121394

Xu, X., Chu, Y., Chen, R., Wu, Q., Chen, X., Zou, F. ve Peng, C. (2022). Thermo-mechanochemical recycling of waste polypropylene into degradation products as modifiers for cleaner production and properties enhancement of bitumen. *Journal of Cleaner Production*, *379*(P2), 134792. doi:10.1016/j.jclepro.2022.134792

Zhang, F. ve Hu, C. (2016). The research for crumb rubber/waste plastic compound modified asphalt. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, *124*(2), 729–741. doi:10.1007/s10973-015-5198-4

Zhang, W., Hao, X., Fan, C., Zhang, S., Ma, D., Yu, X., … Feng, G. (2022). Effect of Polypropylene Grafted Maleic Anhydride (PP-G-MAH) on the Properties of Asphalt and its Mixture Modified With Recycled Polyethylene/Recycled Polypropylene (RPE/RPP) Blends. *Frontiers in Materials*, *9*(April), 1–10. doi:10.3389/fmats.2022.814551



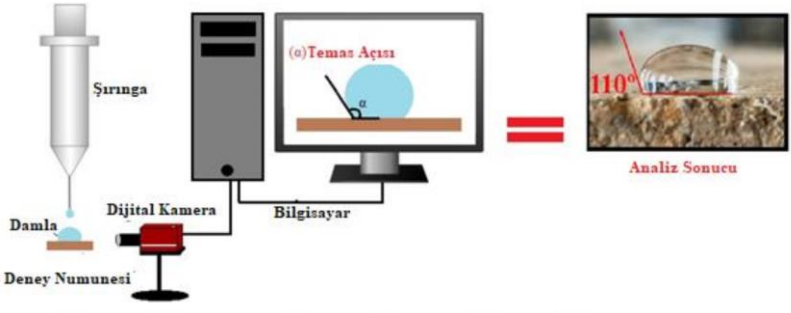
İnşaat Mühendisliğinde Görüntü İşleme Uygulamaları

Batuhan Aykanat[1]

[1] Arş. Gör. Dr., Düzce Üniversitesi, ORCID: 0000-0003-3797-3773

Giriş: İnsanların görme sistemleri aracılığıyla elde ettiği sayısal görüntü verilerinin amaca uygun olacak şekilde dijital ortamda farklı yazılımlar kullanılarak değiştirilmesine yönelik yapılan bilgisayar destekli çalışmalara görüntü işleme adı verilir. Bilgisayar tabanlı bu teknolojilerin gün geçtikçe gelişmesi ve kullanımının yaygınlaşmasıyla birlikte birçok süreç basitleştirilebilir ve problemlerin çözüm süreleri kısalabilir. Bu sebeple görüntü işleme teknikleri ve sayısal görüntü analizleri gibi teknolojik uygulamalar gün geçtikçe daha da yaygın hale gelmektedir. Kullanımının yaygınlaşmasıyla bu teknikler kapsamlı bir şekilde araştırılmış ve özellikle mühendislik çalışmalarında birçok uygulama alanı bulmuştur (Başyiğit et al. 2012; Beycioglu, Çomak, and Akçaabat 2017). Mühendislik uygulamaları ve problemlerinin çözümlerinde sıklıkla görüntü işleme tekniklerinin kullanımına başlanmıştır. Genellikle malzemenin ilk durumu ve son durumu arasındaki farklılığın, alınan görüntüler sayesinde tespiti ve kıyaslanması ile sonuca varılan yöntemler tercih edilmektedir. Bu görüntülerden elde edilen değişimler sayısal verilere dönüştürülerek malzemenin değişimi ile ilgili detaylar belirlenmektedir (İLGÜN et al. 2021). Beton teknolojilerinde kullanımı da yaygınlaşan görüntü işleme teknikleri sayesinde, betonun hava içeriği ve agrega granülometrisinin belirlenmesi, betondaki çatlakların tespit edilmesi, betonarme elemanların mekanik özelliklerinin belirlenmesi ve taze beton özelliklerinin tespit edilmesi mümkündür (Felekoğlu and Keskinateş 2016; Gonzalez and Faisal 2019; Hwang et al. 2010; Krishna et al. 2020; Lee et al. 2019).

Görüntü İşleme Tekniklerinin İnşaat Mühendisliği Alanında Kullanımı: Çeşitli alanlarda olduğu gibi inşaat mühendisliği alanında da görüştü işleme tekniklerinin kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Mühendislik problemlerinin çözümünde yapay zekadan da destek alınarak görüntü işleme yöntemleri ile çözümler üretilmektedir. Örnek bir görüntü işleme deney düzeneği Şekil 6'de verilmektedir.

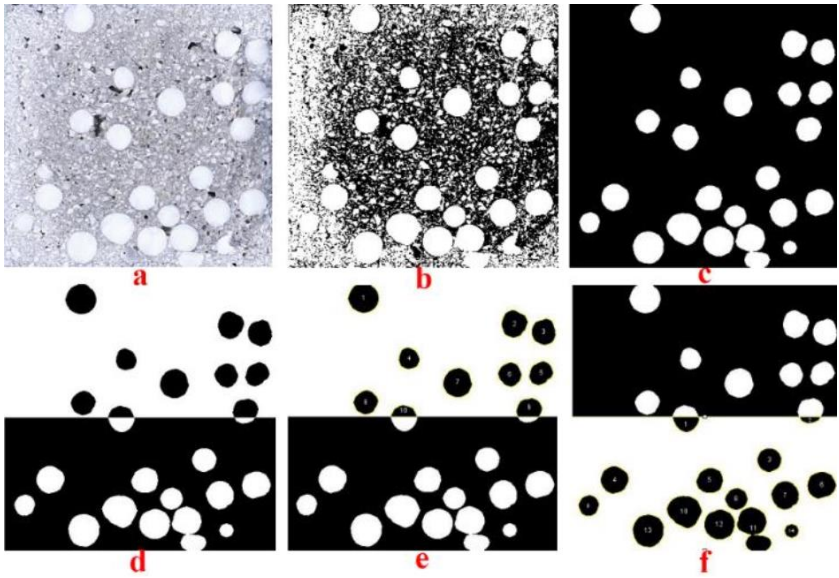


Şekil 6. Görüntü alma ve işleme sürecini gösteren örnek bir deney düzeneği

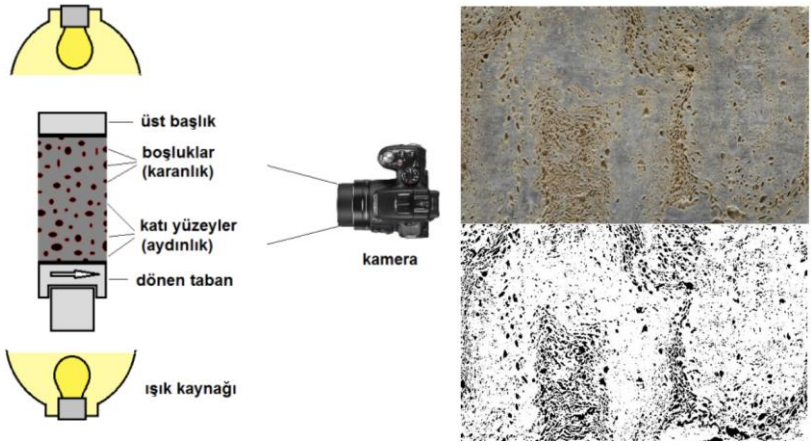
İlgün ve diğ. tarafından yapılan bir çalışmada, doğal taşlardan oluşturulan duvarlar üzerinde yapılan kayma deneyleri sırasında alınan potansiyometrik cetvel verileri ile deney başından sonuna kadar belirli aralıklarla alınan görüntülerin sayısallaştırılması yardımıyla, duvarlarda meydana gelen deformasyon miktarları görüntü işleme yöntemi sayesinde belirlenmiştir. Hesaplamalar sonucunda elde edilen veriler kıyaslandığında %84 oranında benzerlik görülmüştür. Çalışmaları sonucunda, görüntü işleme teknikleri ile elde ettikleri sonuçların oldukça faydalı olduğunu ve daha büyük ölçekli yapılacak olan çalışmalarda hızlı çözüm üretmek için bu yöntemin kullanılabileceğini savunmuşlardır (İLGÜN et al. 2021). Temel mühendislik problemlerinden biri olan yatay ve düşey yer değiştirmenin belirlenmesinde görüntü işleme yöntemlerinin kullanılmasını amaçlayan bir çalışmada, yüksek çözünürlüklü bir dijital kameranın aldığı görüntüler kullanılarak dinamik yer değiştirme hareketi profilleri çıkarılmıştır. Oluşturulan hareket profilleri, sarsma tablasının pozisyon verileriyle kıyaslanarak veriler arasındaki ilişki hesaplanmıştır. Yöntemin çalışmasını ve başarısını değerlendirmek için farklı deney düzenekleri kurularak elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak geliştirdikleri sistemin alternatif bir yöntem olarak kullanılabileceğini tespit etmişlerdir (Cem MORTAŞ 2018).

Beton içindeki donatıların tespiti için kullanılan yöntemlerde temel olarak sayısal görüntü işlemeye dayanır. Gaydecki ve diğ. yaptıkları çalışmada, betona gömülü donatıların yerini tespit etmek için endüktif sensörlü bir sistem kullanarak 16 bit siyah-beyaz görüntülerin dönüşümü yardımıyla çeşitli parametreler elde etmişler ve bu sistemi kullanılabilir hale getirmişlerdir (Gaydecki et al. 2000). Bir başka çalışmada harç, beton ve yüksek dayanımlı betonların bazı mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla kızılötesi termografi ve görüntü işleme yöntemi ile değerlendirme yapılmıştır (Huon et al. 2009). Röntgen ile görüntülerin elde edildiği ve bu görüntülerin dijital görüntü işleme yöntemleri kullanılarak belirli kütle azalma katsayılarına dönüştürüldüğü bir çalışmada, çeşitli malzemelerin radyasyon kalkanı olarak kullanılıp kullanılamayacağını belirlemek için alternatif bir yöntem önerilmiştir (Akkurt et al. 2010). Betonun bazı mekanik özelliklerinin görüntü işleme yöntemleri ile tespit edilmesini hedefleyen bir çalışmada, farklı su/çimento oranı kullanılarak, farklı dayanım sınıfında betonlar üretilmiştir. Üretilen numuneler üzerinde çeşitli mekanik testler geçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar ile, görüntü işleme teknikleri sonucunda elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak bir ilişki kurulmaya çalışılmıştır. Elde edilen görüntüler sonucunda beton içindeki agrega ve çimento matrisinin dağılımı ile ilgili değerler kullanılarak betonun mekanik özellikleri ile olan ilişkileri değerlendirilmiş ve yüksek tutarlılık tespit edilmiştir. Bu kullanılan yöntem sayesinde betonun basınç

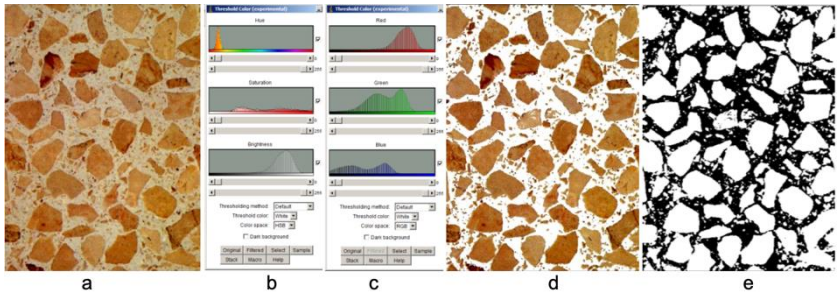
dayanımı gibi özelliklerinin tespitinin yapılabilir olduğu düşünülmektedir (Başyiğit, Kılınçarslan, and Çomak n.d.). Beton içerisinde genişletilmiş polistiren köpüklerin dağılımı inceleyen bir çalışmada kullanılan görüntü işleme aşamalarına ait detaylar Şekil 7'de verilmektedir (Bekir et al. 2022). Görüntü işleme yöntemlerinin mühendislik uygulamalarındaki kullanımı ile alakalı olarak, karot numunelerinin yüzeyinden görüntü alınması Şekil 8'te ve RGB ile HSB histogramları kullanılarak renk eşiklemesi yapılması işlemi Şekil 9'te gösterilmektedir (Dipova 2018).



Şekil 7. Görüntü işleme aşamaları, a) Piksellerin gerçek ölçeğe dönüştürülmesi, b) Treshold uygulaması, c)Morfolojik filtre uygulaması, d) Siyah-Beyaz görüntünün tersine çevrilmesi, e) Üst bölüm analiz işlemi, f) alt bölüm analiz işlemi.



Şekil 8. Karot numuneleri yüzeyinden görüntü alınması işlemi.



Şekil 9. RGB ve HSB histogramları kullanılarak renk eşiklemesi yapılması.

Asfalt numuneleri üzerinde yapılan bir çalışmada, mekanik deneyler sırasında ortadan ikiye ayrılan deney numunelerinin yüzey görüntüleri alınarak, deney sırasında kırılan agregaların miktarını ve matrisin yapısını incelenmiştir. Farklı sıcaklıklarda yeniden birleştirilen ve farklı kırılma durumları dikkate alınan numunelerin, görüntü işleme yöntemleri kullanılarak toplam hasar yüzdeleri hesaplanmış ve tartışılmıştır (Atakan and Yıldız 2024). Karbonatlaşmanın ve betonun pH dengesinin yapı sağlığı üzerindeki önemi bilinmektedir. Betonun karbonatlaşmasının ve pH değerinin ölçülmesinin görüntü işleme teknolojisi ve endoskopik yöntemlerle yapıldığı bir çalışmada, yüksek oranda (%99) doğru sonuçlara ulaşıldığı ifade edilmiştir (Uygunoğlu et al. 2024). Tüm bu yapılan güncel çalışmalar, görüntü işleme teknikleri ve yapay zekanın, inşaat mühendisliği alanında kullanımının uygunluğunun bir göstergesidir.

Sonuç ve Değerlendirme: Bilgisayar teknolojilerinin gelişimi ile birlikte görüntü işleme teknikleri de gelişmekte ve inşaat mühendisliği alanında daha fazla kullanım alanı bulmaktadır. Ayrıca bu tekniklerin yapay zekâ ile birleştirilerek kullanımı daha karmaşık problemlerin çözülmesine olanak sağlamaktadır. Temel

mühendislik problemlerinin yanı sıra karmaşık mühendislik problemlerinin de daha düşük maliyet, daha düşük iş gücü ve daha kısa zamanda çözüme ulaştırılması inşaat mühendisliği ve diğer mühendislikler için önem taşımaktadır. Bu sebeple, görüntü işleme teknikleri ve yapay zekanın inşaat mühendisliği alanında yaygınlaşarak kullanılmasına devam edilmesi ve daha karmaşık problemlerin çözümüne dair çalışmalar yapılması önerilmektedir.

KAYNAKÇA

Akkurt, I., B. Comak, S. Kilincarslan, and C. Basyigit. 2010. "Image Processing Technique (IPT) to Determine Radiation Shielding." *Digital Signal Processing* 20(6):1592–96. doi: https://doi.org/10.1016/j.dsp.2010.03.008.

Atakan, Mert, and Kürşat Yıldız. 2024. "Effect of Aggregate Damage on Self-Healing Characteristics of Asphalt Concrete: An Image Processing-Based Method." *Construction and Building Materials* 425:135924. doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2024.135924.

Başyiğit, Celalettin, Bekir Çomak, Şemsettin Kilinçarslan, and Ismail Serkan Üncü. 2012. "Assessment of Concrete Compressive Strength by Image Processing Technique." *Construction and Building Materials* 37:526–32. doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2012.07.055.

Başyiğit, Celalettin, Şemsettin Kılınçarslan, and Bekir Çomak. n.d. "Görüntü Işleme Tekniği Ile Beton Basınç Dayanımının Tahmin Edilmesi." *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi* 16(1).

Bekir, Comak, Aykanat Batuhan, Bideci Ozlem Salli, and Bideci Alper. 2022. "Determination of Homogeneity Index of Cementitious Composites Produced with Eps Beads by Image Processing Techniques." *Computers and Concrete* 29(2):107–15. doi: 10.12989/CAC.2022.29.2.107.

Beycioglu, Ahmet, Bekir Çomak, and D. Akçaabat. 2017. "Evaluation of PH Value by Using Image Processing." *Acta Physica Polonica A* 132:1142–44. doi: 10.12693/APhysPolA.132.1142.

Cem MORTAŞ. 2018. "Dijital Kamera ve Lazer Işaretleyici Kullanılarak Görüntü Işleme Yöntemiyle Yer Değiştirmenin Ölçülmesi." Ankara.

Dipova, Nihat. 2018. "Görüntü Analizi Yöntemlerinin Geoteknik Mühendisliğinde Kullanımı." *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi* 9(1):33–44. doi: 10.29048/makufebed.345053.

Felekoğlu, Burak, and Muhammer Keskinateş. 2016. "Multiple Cracking Analysis of HTPP-ECC by Digital Image Correlation Method." *Computers and Concrete* 17:831–48. doi: 10.12989/cac.2016.17.6.831.

Gaydecki, P., I. Silva, B. T. Fernandes, and Z. Z. Yu. 2000. "A Portable Inductive Scanning System for Imaging Steel-Reinforcing Bars Embedded within Concrete." *Sensors and Actuators A: Physical* 84(1–2):25–32.

Gonzalez, Rafael, and Zahraa Faisal. 2019. *Digital Image Processing Second Edition*.

Huon, Vincent, Bruno Cousin, B. Wattrisse, and O. Maisonneuve. 2009. "Investigating the Thermo-Mechanical Behaviour of Cementitious Materials Using Image Processing Techniques." *Cement and Concrete Research* 39(6):529–36.

Hwang, Chao-Lung, S. S. Peng, Edward Wang, S. H. Lin, and S. L. Huang. 2010. “A Quantitative Measurement of Concrete Air Content Using Image Analyses.” *Computers and Concrete* 7. doi: 10.12989/cac.2010.7.3.239.

İLGÜN, Abdulkerim, Ahmad Javid ZIA, Vahdettin DEMİR, Abdullah MÜSEVİTOĞLU, and Sadrettin SANCIOĞLU. 2021. “TEK KATLI DUVAR DEFORMASYONUNUN GÖRÜNTÜ İŞLEME TEKNİKLERİ KULLANILARAK BELİRLENMESİ.” *Euroasia Journal of Mathematics, Engineering, Natural & Medical Sciences* 8(17):21–29. doi: 10.38065/euroasiaorg.590.

Krishna, B., Guru Reddy, Tezeswi Tadepalli, Rathish Pancharathi, and Lahir Yerra. 2020. “Numerical and Experimental Study on Flexural Behavior of Reinforced Concrete Beams: Digital Image Correlation Approach.” doi: 10.12989/cac.2019.24.6.561.

Lee, Jong-Han, Chi-Young Jung, Tae-Ryeon Woo, and Jin-Hwan Cheung. 2019. “Post-Yielding Tension Stiffening of Reinforced Concrete Members Using an Image Analysis Method with a Consideration of Steel Ratios.” *Advances in Concrete Construction* 7(2):117.

Uygunoğlu, Tayfun, Uğur Fidan, Barış Şimşek, and Adem Tuncer. 2024. “Determination of Carbonation Depth and PH in Concrete Containing Crystalline Waterproofing Agents Using the Endoscopic Method.” *Journal of Building Engineering* 94:110041. doi: 10.1016/J.JOBE.2024.110041.

BÖLÜM 9

Bazalt Agregalarının Tekrarlı Yükler Altındaki Plastik Şekil Değiştirme Özelliklerinin İncelenmesi

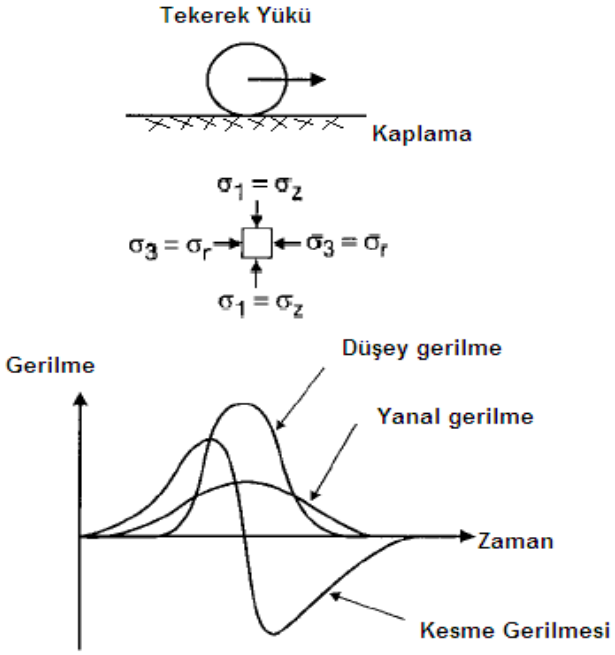
***Altan Yılmaz*[1]**

[1] Doç. Dr., Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, ORCID No: 0000-0001-9925-6812

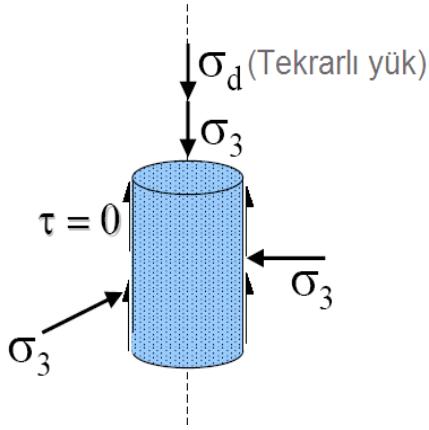
GİRİŞ

Esnek üstyapılarda kullanılan malzemelerin mekanik özelliklerinin gerçekçi bir şekilde belirlenebilmesi için, düşey yükten dolayı oluşan gerilmelerin büyüklüğü ve frekansı, malzeme gradasyonu ve sıkıştırılma şartları gerçek ortam şartlarına en uygun şekilde dikkate alınmalıdır. Trafikten kaynaklanan dinamik yüklerin de temsil edildiği daha kompleks deney yöntemlerinin uygulanması burada önem kazanmaktadır (Karaşahin ve Tığdemir, 1998). Dinamik üç eksenli (DÜE) deneyi granüler malzemeler için Şekil 1'de belirtilen gerilme durumuna en yakın modeli (kesme gerilmesi hariç) oluşturduğu için plastik şekil değiştirme çalışmalarda tercih edilmektedir.

Düşey ve yanal gerilmeler, dinamik üç eksenli deneylerinde numuneye Şekil 2'de görüldüğü gibi uygulanmakta, kesme gerilmesinin tekerlek ekseni altında sıfır olduğu kabul edilmektedir.



Şekil 1. *Tekerlek yükü altındaki üstyapı malzemesine etkiyen gerilmeler (Lekarp v.d. 2000)*



Şekil 2. *DÜE deneyinde silindir numuneye etkiyen gerilmeler*

Dinamik üç eksenli deneyleri ile hem granüler (kohezyonsuz) malzemelerin hem de kohezyonlu zeminlerin "Esneklik modülü" ve tekrarlı yükler altındaki "Plastik şekil değiştirmesi" ölçülebilmektedir. Analitik üstyapı tasarımında malzemelerin bu özelliklerinin belirlenmesi önem arz etmektedir (Yılmaz ve Saltan 2012).

Plastik Deformasyon Deneyleri

Esnek üstyapı performansının göstergelerinden birisi de plastik deformasyondur. Esnek üstyapı da oluşan plastik deformasyonun belirli bir değerin üstünde olması istenmez. Gelişmiş ülkelerin bu konuda belirlediği sınır değerler mevcuttur, yol yüzeyinde oluşan toplam plastik deformasyon bu sınır değeri aşarsa yolun rehabilitasyona alınması gerekmektedir.

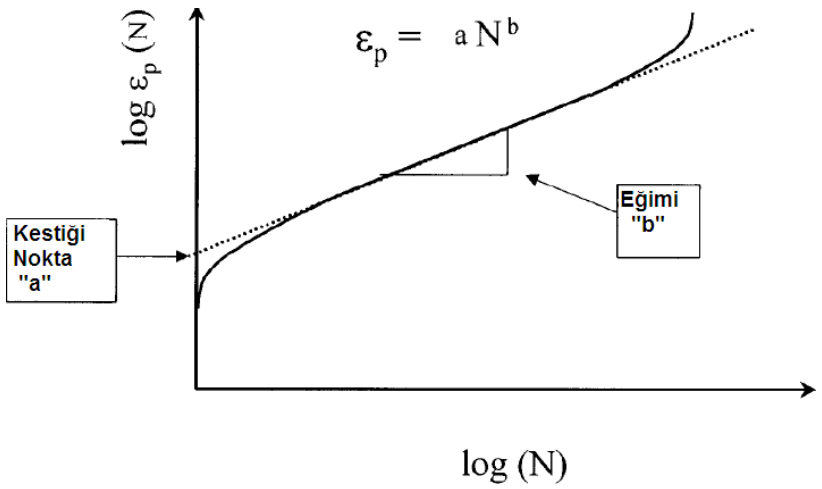
Plastik deformasyon deneyi, yoldan geçen araçların oluşturduğu tekrarlı dingil yükleri altında, üst yapı malzemesinin plastik şekil değiştirmesinin (düşey yönde) tayini için uygulanmaktadır. Yüksek tekrar sayıları ile gerçekleştirilen dinamik üç eksenli deneyi sonucunda, elde edilen plastik deformasyon değerleri, yük tekrar sayısına karşılık kümülatif olarak grafiğe aktarılır. Toplam plastik şekil değiştirmenin yük tekrar sayısı ile değişimini gösteren tipik grafik Şekil 3'de görülmektedir.

Plastik deformasyon değerinin matematiksel modelini oluşturmak için pek çok araştırmacı çalışma yapmıştır. Bunlardan büyük bir kısmı plastik deformasyonun yük tekrarı (N) değeri ile değiştiğini öne sürerek tahmin modelleri geliştirmişlerdir.

Deney sonuçlarını matematiksel olarak tanımlamak için en sık kullanılan model aşağıdaki eşitlik ile ifade edilmektedir.

$$\varepsilon_p = aN^b$$

Burada “a” değeri, 1. yüklemedeki plastik şekil değiştirmeyi, “b” değeri ise eğrinin eğimini, dolayısıyla yük tekrarları karşısında plastik şekil değiştirmenin değişimini ifade etmektedir. Regresyon sabitlerinin logaritmik grafikte gösterilişi Şekil 3’de görülmektedir.



Şekil 3. *Toplam plastik şekil değiştirmenin yük tekrar sayısı ile değişimini gösteren logaritmik grafik*

Eşitlikteki, a ve b parametreleri eğriyi oluşturan deney sonuçlarının regresyon analizi ile elde edilmektedir. Bu parametreler malzeme özelliklerine göre ve deney fiziksel şartlarına bağlı olarak değişmektedir.

Bu çalışmada bazalt agregalarının tekrarlı yükler altında plastik şekil değiştirme özellikleri incelenmiştir. Anadolu’dan 4 farklı ilden ve 6 farklı agrega ocağından temin edilen kırma-taş agregalar üzerinde deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Bazalt agregası

Bazalt doğada en yaygın olarak bulunan volkanik kayaç grubunu teşkil eder. Çok geniş alanlarda yayılıma sahip lav akıntıları olup, bazen yüzlerce kilometrekarelik alanları kaplayacak şekilde (plato bazaltları) bulunabilirler. Yerkabuğunun 2,5 milyon km^2 den fazlasını bazalt örter. Bazaltlar ayrıca subvolkanik koşullar altında gelişmiş dayk, sil ve baca dolguları şeklinde de bulunabilirler.

Bazalt esas olarak Si_2O, Al_2O_3, MgO, CaO ve demir oksitler (FeO, Fe_2O_3) 'den meydana gelmektedir. Bunların dışında bileşim az miktarda Na_2O, K_2O, P_2O_5, MnO ve TiO_2 oksitlerini de içermektedir.

Bazalt koyu siyah renkli, ufak kristalli veya camsı, volkanik bir kayaç olup, gabronun yüzey tipidir. Bileşiminde plajioklaz, ojit, olivin, nadiren kuvars, manyetit ve ilmenit bulunur. Bunlar koyu siyah renkli camsı bir hamur içindedir. Gözle ancak iri mineraller ve örneğin; olivin, kuvars, ojit ve plajioklaz fark edilir. Düşük viskozite değeri volkanik gazların, püskürme sütunları meydana getirmeden çıkmalarına izin verir.

Bazalt günümüzde yapı sektöründen koruyucu kaplamalara, seramik sektöründen cam seramik üretimine kadar pek çok alanda kullanılmaktadır. Ülkemiz bazalt kaynakları açısından oldukça zengindir. Bu malzemenin metalürjik özellikleri de düşünüldüğünde bazalt ülkemize stratejik bir önem kazandırmaktadır.



Şekil 4. *Konkasörde kırılmış bazalt agregaları*

Türkiye'de Diyarbakır, Elazığ, Gaziantep, Kastamonu, Kahramanmaraş, Sivas, Çorlu, Şanlıurfa, Manisa ve Ankara-Kızılcahamam bölgesinde bazalt ve dayk yayılımları bulunmaktadır (Kahveci, 2008).

Aşınma direncinin yüksek olması ve dış etkenlere karşı mukavemeti bazaltın kullanım alanlarını arttırmaktadır. Fiziksel ve mekanik özellikleri göz önünde bulundurularak bazalt taşı, değişik oranlarda agrega olarak betona katılmaktadır. Ayrıca cam-seramiklerde, mineral tabanlı yalıtım sistemlerinde, karayollarında yapı malzemesi olarak, demiryollarında balast olarak yaygın olarak kullanılmaktadır. Seramik esaslı olması bakımından sahip olduğu yüksek termal ve mekanik özellikleri kaplama malzemesi olarak ta kullanılabilirliği konusunda olumlu fikirler oluşturmaktadır (Yılmaz, 1997).

MATERYAL VE YÖNTEM

Deneysel çalışmalar da kullanılmak üzere Isparta, Afyon, Ankara, Konya ve Kütahya illerinden bazalt agregaları temin edilmiştir. Şekil 5'de alınan numunelerden örnekler görülmektedir. Alınan numunelerin kısaltılmış isimlerini ise Çizelge 1'de verilmiştir. Grafiklerin okunmasında kolaylık sağlaması amacıyla bu bölümden itibaren numuneler kısaltılmış isimleri ile anılacaktır.

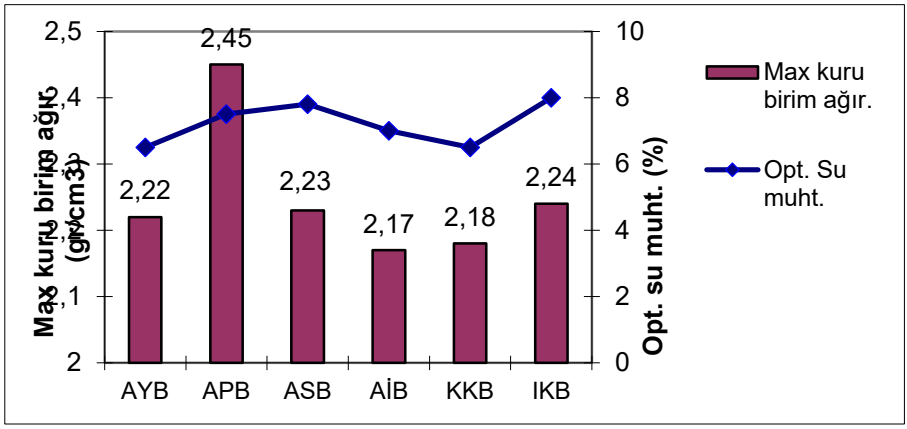


Şekil 5. *Tane büyüklüğüne göre sınıflandırılmış bazalt agregaları*

Çizelge 1. Agregaların kısaltılmış adları

Malzeme açık adı	Kısaltılmış adı
Ankara Yapracık Bazaltı	AYB
Ankara Polatlı Bazaltı	APB
Afyon Sandıklı Bazaltı	ASB
Afyon İscehisar Bazaltı	AİB
Konya Kulu Bazaltı	KKB
Isparta Kayı Bazaltı	IKB

Bazalt agregaların optimum su içeriği %6.5 - %10 aralığında elde edilmiştir. Maksimum kuru birim ağırlık değerleri ise 1.96 – 2,45 gr/cm^3 aralığındadır. Max kuru birim ağırlık ile optimum su muhtevası ilişkisi grafiği Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. *Max kuru birim ağırlık – optimum su muhtevası ilişkisi*

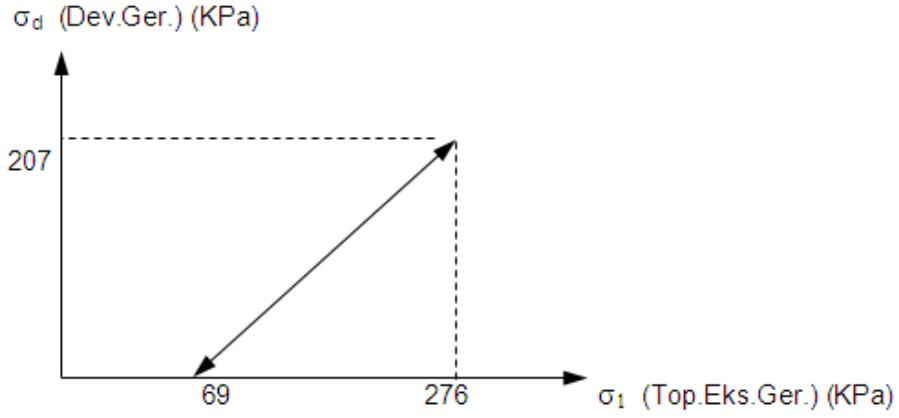
Deneysel Yöntem

Plastik deformasyon deneyi, yoldan geçen araçların oluşturduğu tekrarlı dingil yükleri altında, üst yapı malzemesinin plastik şekil değiştirmesinin (düşey yönde) tayini için uygulanmaktadır. Plastik deformasyon, farklı deney yöntemleri kullanılarak belirlenebilmektedir.

Bu çalışmada Şekil 8'de görülen dinamik üç eksenli deney cihazı ile plastik deformasyon deneyleri uygulanmıştır. Deneylerde kullanılan silindir numuneler optimumu su muhtevasında maksimum birim ağırlık elde edilecek şekilde hazırlanmıştır. Deneylerde sıkıştırma yöntemi olarak titreşimli kango çekici kullanılmıştır.

Hazırlanan silindir numuneler üç eksenli hücresinde aşağıda belirtilen (Şekil.7) gerilmeler altında tekrarlı yüklere maruz bırakılmıştır. Literatür araştırmalarından görülmüştür ki, deneyle ilgili detaylı ve yaygın kullanımı olan bir standart mevcut değildir. Yük tekrarı olarak, 1000 ila 1 milyon tekrar arasında çok farklı uygulamalar yapılmaktadır. Ancak ilk 1000 tekrardan sonra plastik deformasyon değerinin büyük oranda azaldığı pek çok çalışmada vurgulanmıştır. Gerilme oranı (σ_1/σ_3) için de 2-10 arasında farklı oranlar uygulanmıştır (Sweere, 1990; Bonaquist ve Witzack, 1996; Kancherla, 2004). Kullanılan malzemenin dayanımına bağlı olarak, yüksek sayıdaki tekrarlı yükler altında numunede göçme oluşmayacak şekilde, uygun gerilme oranları belirlenmiştir. Bu çalışmada, kullanılan malzemenin dayanımına bağlı olarak σ_1/σ_3 oranı 4 olarak seçilmiştir.

Hücre basıncı için literatürde granüler malzemeler için en sık kullanılan değerler incelenmiş ve 69 kPa değerinde karar kılınmıştır. Plastik deformasyon deneylerinde uygulanan gerilmeleri gösteren grafik Şekil 7'de verilmiştir. Yük tekrarı için öncelikle farklı tekrar sayıları ile denemeler yapılmış ve ilk 1000 yüklemeden sonra plastik deformasyon gelişiminin oldukça azaldığı görülmüştür. Deneylerde 10.000 yük tekrarı uygulanmıştır.

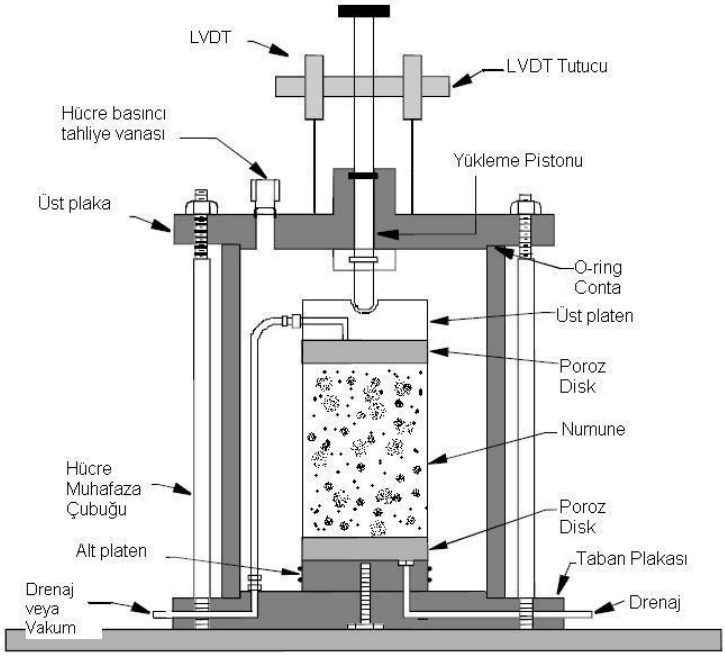


Şekil 7. *Plastik deformasyon deneyinde uygulanan gerilme değerleri*



Şekil 8. *MAKU-TRX deney cihazı ve numunenin cihazına yerleştirilmesi*

Deformasyon Ölçümü: Bu çalışmada düşey deformasyon ölçümü amacıyla, ±15 mm kapasiteli LVDT kullanılmıştır. Yapılan deneylerde numunenin deformasyonu, yükleme pistonu üzerinden, tüm numune uzunluğu boyunca ölçülmüştür. Şekil 9'da hücre dışından LVDT ile deformasyon ölçümü görülmektedir.



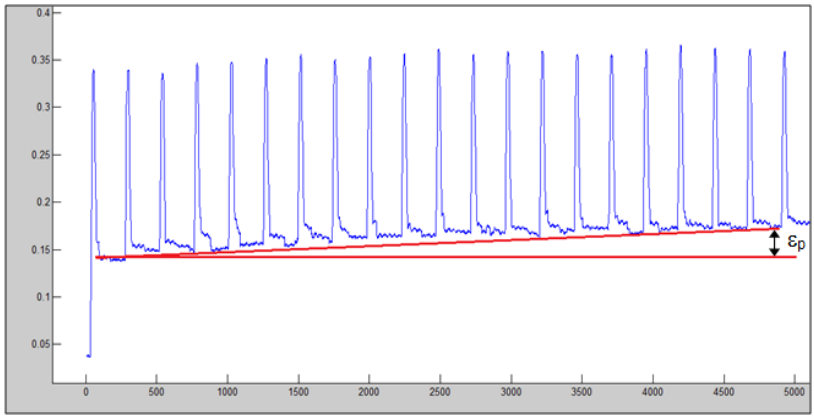
Şekil 9. *Üç eksenli hücresi ve piston üzerinden LVDT ile deformasyon ölçümü*

BULGULAR

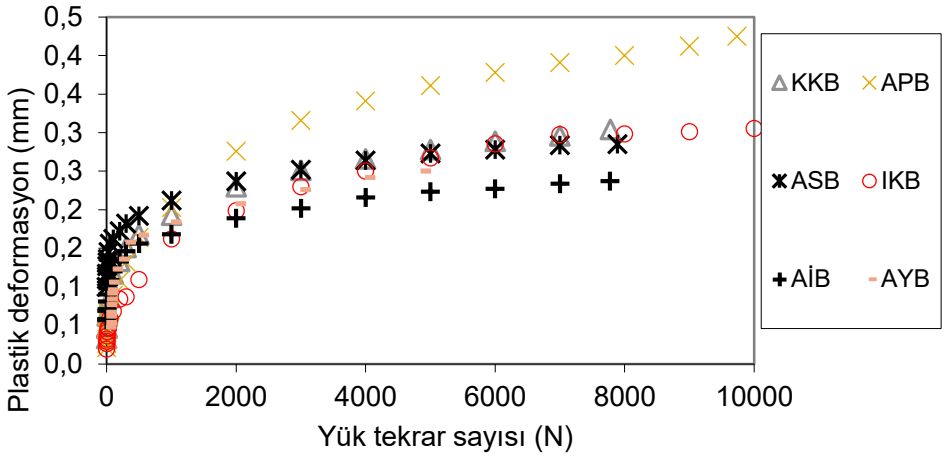
Plastik Deformasyon Deneyi Bulguları

Plastik deformasyon deneylerinde ilk yükleme tekrarı için diğerlerine oranla yüksek bir şekil değiştirme oluşmaktadır. Bu durumu gösteren tekrarlı yükleme grafiği Şekil 10'da görülmektedir. Pappin (1979), bunun yolun trafiğe açılmadan önceki inşaatı sırasında oluşan oturma değeri olarak kabul edilebileceğini, bir yolun uzun süreli dayanımının tespiti açısından ilk birkaç yüklemeden sonra oluşan plastik deformasyon değerlerinin daha dikkate değer olduğunu vurgulamıştır. Dolayısıyla birinci yüklemedeki bu şekil değiştirme değeri hesaplarda dikkate alınmamıştır.

10.000 yük tekrarı ile gerçekleştirilen dinamik üç eksenli deneyi sonucunda, elde edilen plastik deformasyon değerleri, yük tekrar sayısına karşılık kümülatif olarak grafiğe aktarılmıştır (Şekil 11).



Şekil 10. *İlk 20 yük tekrarları için oluşan plastik ve elastik şekil değiştirmeler*



Şekil 11. *Plastik deformasyon deneyi bulguları*

Plastik deformasyon deneyi sonuçlarından görüldüğü üzere, ilk 1000 yük tekrarı için plastik deformasyonun hızlı geliştiği, daha sonra grafiklerin yataya yakın bir seyir izlediği görülmektedir. 10.000 yük tekrarı için oluşan toplam plastik deformasyon değerleri 0,237 mm ile 0,40 mm arasında değişmektedir. Toplam plastik şekil değiştirme değerleri ise %0,79 ile %1,333 arasındadır. Tüm malzemelerin plastik deformasyon (ε_p) değerleri Çizelge 2'de verilmiştir. En yüksek plastik deformasyon değerleri APB agregasında elde edilmiştir. En düşük değerler ise AİB ve ASB agregasında elde edilmiştir.

Çizelge 2. Plastik deformasyon deneyi özet bulguları

Numune tanımı	Gerilme oranı (σ_1/σ_3)	Yük Tekrar sayısı (N)	Toplam Plastik Def. (mm)	Toplam Şekil Değ. (μm)
AYB	4	8000	0,298	993,3
APB	4	8000	0,40	1333,3
ASB	4	8000	0,285	950,0
AİB	4	8000	0,237	790,0
KKB	4	8000	0,304	1013,3
IKB	4	8000	0,298	993,3

Yol yüzeyindeki düşey deformasyon genellikle üstyapının çeşitli tabakalarında meydana gelen deformasyonların toplamı olarak dikkate alınır. AASHTO yol deneyleri granüler tabakaların ve zeminlerin düşey deformasyonlarının, toplam deformasyonun temel bileşeni olduğunu göstermiştir. Üstyapıda oluşan toplam plastik deformasyon için, bazı gelişmiş ülkeler sınır değerler getirmişlerdir. Bu değerin üstüne çıkıldığı zaman yol bakıma alınmaktadır.

SONUÇLAR

Bu çalışmada bazalt agregalarının tekrarlı yükler altında plastik şekil değiştirme özellikleri incelenmiştir. Anadolu'dan 4 farklı ilden ve 6 farklı agrega ocağından temin edilen kırma-taş agregalar üzerinde deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Plastik deformasyon deneylerinde ilk 1000 yük tekrarı için plastik deformasyonun hızlı geliştiği, daha sonra grafiklerin yataya yakın bir seyir izlediği görülmüştür (Şekil 11). 10.000 yük tekrarı için oluşan toplam plastik deformasyon değerleri 0,237 mm ile 0,40 mm arasında, toplam plastik şekil değiştirme değerleri ise %0,79 ile %1,333 arasında değerler almıştır. En yüksek plastik deformasyon değerleri APB agregasında, en düşük değerler ise AİB ve ASB agregalarında elde edilmiştir.

Anayolların bakıma alınıp yenilenmesinde tekerlek izi derinliğinin yavaş trafikli şeritte 20 mm'yi aşması temel kriter olarak dikkate alınmaktadır. TRRL'in (Transportation Road Research Laboratory) bulgularına göre tekerlek izi derinliği 10 mm'yi aştığı durumlarda yüzeyde önemli çatlaklar başlamaktadır (Tığdemir, 1999). Ancak bu ölçüt tüm tabakaların toplam deformasyonu şeklindedir,

dolayısıyla her bir tabakada oluşan plastik deformasyon değeri bilinirse toplam deformasyon da hesaplanabilmektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonunca desteklenmiştir. Proje Numarası: 0298-NAP-16 ve 0185-NAP-13.

KAYNAKLAR

AASHTO T294-94, Resilient Modulus of Unbound Granular Base/Subbase Materials and Subgrade Soils – SHRP Protocol P46. Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing, 17th Edition, Washington D.C., (1995).

AASHTO, Guide for Design of Pavement Structures, American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), Washington, D.C., (1986).

ANONİM, Karayolu Teknik Şartnamesi, Karayolları Genel Müdürlügü Yayınları No:267, Ankara, (2006).

Blight, G. E., Permanent deformation in asphaltic materials, J. Transp. Engrg., ASCE, 100(1), 263–278. (1974).

Bonaquist, R. M., Witzack, M., Plasticity Modeling Applied to the Permanent Deformation Response of Granular Materials in Flexible Pavement Systems, Transportation Research Record 1540, Washington, D.C., Pp: 7-14, (1996).

Kahveci, A.E., Diyarbakır Yöresinde Bazalt Taşının Yapı Malzemesi Olarak Kullanımının İncelenmesin Üzerine Bir Araştırma, Y.L. Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, (2008).

Kancherla, A., Resilient Modulus and Permanent Deformation Testing of Unbound Granular Materials, (M.S. Thesis), Texas A&M University, (2004).

Karaşahin, M., Tığdemir, M., Türkiye Koşullarında Uygun Bir Esnek Üstyapı Kalınlık Tasarım Metodu Geliştirilmesi için Yeni Bir Yaklaşım, Asfalt'98, 2. Ulusal Asfalt Sempozyumu. Ankara, (1998) pp: 238-247.

Lekarp, F., Isacsson, U., and Dawson, A., State of Art I: Resilient Response of Unbound Aggregates, Journal of Transportation Engineering, ASCE, Vol (1), (2000).

Pappin, J.W., Characteristics of a Granular Material for Pavement Analysis. (PhD. Thesis), University of Nottingham, (1979).

Sweere, G.T.H., Unbound Granular Bases for Roads, Dissertation, Delft University of Technology, (1990).

Tığdemir, M., Bitümlü Malzemelerin Mekanik Özelliklerinin Parametrik İncelenmesi, (Doktora tezi), Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, 106 s., (1999).

Yılmaz, A. , Saltan M., Türkiye'deki Esnek Üstyapılarda Yoğun Olarak Kullanılan Granüler Malzemelerin Tekrarlı Yükler Altındaki Elastik Özelliklerinin İncelenmesi, TÜBİTAK Proje sonuç raporu (2012).

Yılmaz, Ş., Volkanik Bazalt Kayaçlarından Cam- Seramik Malzeme Üretimi ve Özellikleri, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul, (1997).

Yılmaz, A. Esnek Üstyapılarda Yoğun Olarak Kullanılan Volkanik Kökenli Granüler Malzemelerin Tekrarlı Yükler Altındaki Elastik Özelliklerinin İncelenmesi, Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, BAP Proje Sonuç Raporu, (2018).

BÖLÜM 10

Atatek-Solar Yazılımı ile Adana İlinin Global Güneş Radyasyonunu Tahmin Eden Modellerin Optimizasyonu

Recep Külcü[1] & Ahmet Süslü[2]

[1] ISUBÜ Ziraat Fakültesi Tarım Makineleri ve Teknolojileri Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye
ORCID: 0000-0002-7185-6514
[2] ISUBÜ Ziraat Fakültesi Tarım Makineleri ve Teknolojileri Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye
ORCID: 0000-0003-4016-589X

GİRİŞ

Global güneş radyasyonu, yeryüzüne düşen ışınım miktarını ifade etmektedir ve güneş enerjisi hesaplamalarında kritik bir öneme sahiptir. Atmosfer dışına düşen ışınım büyük bir doğrulukla hesaplanabilirken, atmosfer dışından yer yüzüne ulaşana kadar bu ışınımda meydana gelen değişimlerin çok farklı faktörlerden etkilenmesi nedeniyle modellerle tahmin edilmesi gerekmektedir. Bu bağlamda farklı modeller hesaplama yapılan coğrafi koordinat için çözümlenerek karşılaştırma yapılması gerekmektedir. Çözümleme işlemleri modellerin ölçülen veriler kullanarak iterasyon yoluyla optimizasyonu şeklinde gerçekleştirilmektedir. Model optimizasyonları yapıldıktan sonra istatistiksel değerlendirme parametreleri hesaplanarak tahmin başarıları karşılaştırılmaktadır. Bu karşılaştırmalar sonucunda en başarılı tahminleri gerçekleştiren modeller belirlenmektedir.

Bu çalışmada Adana ilinin global güneş ışınımı miktarını tahmin etmek amacıyla kullanılan modellerin ATATEK-Solar yazılımı kullanılarak modellenmesi ve en başarılı tahminleri gerçekleştiren modelin belirlenmesi hedeflenmiştir. ATATEK-Solar yazılımı, Dr. Ahmet SÜSLÜ ve Prof. Dr. Recep KÜLCÜ tarafından global güneş radyasyonu modellerinin optimizasyonu için geliştirilmiş PHP tabanlı bir yazılımdır (Süslü ve Külcü, 2024). Yazılım 15 tahmin modelini, 4 farklı yönteme göre optimize etmekte ve analizlerde her modeli en başarılı şekilde çözümleyen yöntemi kullanmaktadır. Model karşılaştırmalarını RMSE ve R^2 parametrelerini kullanarak gerçekleştirmektedir. Bu bağlamda ATATEK-Solar yazılımı araştırmacıların birden fazla programda çok uzun sürelerde yapılan model optimizasyonu ve istatistiksel analiz işlemlerini tek yazılım içerisinde ve çok hızlı bir şekilde gerçekleştirebilmektedir.

ATATEK-Solar programı ve daha önce kullanılan yazılımlarda araştırmacılar atmosfer dışına gelen ışınım miktarının hesaplanmasında aynı teorik hesaplama yöntemini kullanmaktadırlar. Bu hesaplamalarda deklinasyon ve gün batımı saat açısı kullanılarak atmosfer dışında bir metrekare alana bir günde gelen toplam ışınım miktarı belirlenmektedir. Bu hesaplamada 1,2,3 ve 4 numaralı eşitlikler kullanılmaktadır.

Adana'da atmosfer dışına gelen güneş ışınımı miktarının hesaplanması

Atmosfer dışına bir günde gelen ışınım miktarı 1 ve 2 numaralı eşitlikler kullanılarak hesaplanmıştır (Duffie ve Beckman, 2006; Mengec ve ark., 2006).

$$H_O = \frac{24x3600xG_{sc}}{\pi} f \left[Cos\varphi\ Cos\delta\ sinw_s + \frac{\pi}{180} w_s Sin\varphi Sin\delta\right] \qquad (1)$$

$$f = 1 + 0.033 \left(Cos \frac{360n}{365}\right) \qquad (2)$$

H_o değerinin hesaplanabilmesi için öncelikle deklinasyon ve gün batımı saat açılarının belirlenmesi gerekmektedir. Deklinasyon açısı, dünyanın güneş etrafında döndüğü düzlem ile ekvatoral eksen arasındaki açıyı ifade etmektedir. Bu değer 21 Haziranda maksimum, 21 Aralıkta minimum değeri alırken 21 Mart ve 21 Eylül günlerinde sıfır olmaktadır. Hesaplama yapılan günün, yılbaşından itibaren, kaçıncı gün olduğuna göre değişen deklinasyon açısı 3 numaralı eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır. (Ertekin ve Yaldız, 2000; Bakırcı, 2009; Duffie ve Beckman, 2006; Ertekin ve ark., 2008).

$$\delta = 23.45\ Sin\left(360\frac{n+284}{365}\right) \quad (3)$$

Gün batımı saat açısı, güneş ışınlarının (güneşin battığı saatte) bulunduğu enlem ile hesaplama yapılan enlem arasındaki açıyı ifade etmektedir. Gün batımı saat açısı 4 numaralı eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır (Duffie ve Beckman, 2006).

$$w_s = arccos[-tan(\varphi)tan(\delta)] \quad (4)$$

Adana'da global aylık ortalama günlük güneş ışınımı miktarının hesaplanması

Adana'da yeryüzüne ulaşan güneş ışınımının hesaplanmasında literatürde yer alan modeller ve çalışma kapsamında geliştirilen modeller kullanılmıştır. Literatürde yer alan modellerde değişken olarak S/S_0 (Bulutluluk katsayısı) ve saat açısı (w_s) katsayısı kullanılmaktadır. Burada S hesaplama yapılan tarih ve koordinatta o güne ait güneşlenme süresini, S_0 ise aynı gün ve aynı yerdeki toplam gün uzunluğunu ifade etmektedir. S değeri meteorolojik ölçümlere göre belirlenirken, S_0 değeri 5 numaralı eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır (Duffie ve Beckman, 2006; Ertekin ve ark., 2008).

$$S_{0=}\frac{2}{15}\cosh^{-1} - \tan\delta\tan\varphi \quad (5)$$

Çalışma kapsamında kullanılan modeller

ATATEK-Solar yazılımı güneş ışınımı modellemesinde 15 ayrı model kullanmaktadır. Bu modellerden 14 tanesi literatürde yer alan çalışmalardan derlenmiş, bir tanesi ise (Model 15) yazılımın oluşturulma aşamasında yapay zekâ aracı kullanılarak geliştirilmiştir.

Model 1 [Angstrom-Prescott modeli Angstrom (1924) tarafından oluşturulmuş ve Prescott (1940) tarafından geliştirilmiştir.

$$\frac{H}{H_0} = c_1 + c_2\left(\frac{S}{S_0}\right) \quad (6)$$

Model 2 [Elagib and Mansell, 2000];

$$\frac{H}{H_0} = c_1 + c_2\left(\frac{S}{S_0}\right)^{c_3} \quad (7)$$

Model 3 [El-Metwally, 2005];

$$\frac{H}{H_0} = {c_1}^{(1/S)} \quad (8)$$

Model 4 [Külcü, 2015];

$$\frac{H}{H_0} = \left[\frac{c_1\left(\frac{S}{S_0}\right)}{c_2\, w_s}\right] + c_3 w_s \quad (9)$$

Model 5 [Bahel et al., 1987];

$$\frac{H}{H_0} = c_1 + c_2\left(\frac{S}{S_0}\right) + c_3\left(\frac{S}{S_0}\right)^2 + c_4\left(\frac{S}{S_0}\right)^3 \quad (10)$$

Model 6 [Ampratwum and Dorvlo, 1999];

$$\frac{H}{H_0} = c_1 + c_2\left(\frac{S}{S_0}\right) + c_3 \log\left(\frac{S}{S_0}\right) \quad (11)$$

Model 7 [Almorox and Hontoria, 2004];

$$\frac{H}{H_0} = c_1 + c_2 \exp\left(\frac{S}{S_0}\right) \quad (12)$$

Model 8 [Dogniaux and Lemoine, 1983];

$$\frac{H}{H_0} = c_1 + \left[c_2\left(\frac{S}{S_0}\right) + c_3\right]\varphi + c_3\left(\frac{S}{S_0}\right) \quad (13)$$

Model 9 [Külcü, 2019];

$$\frac{H}{H_0} = c_1 + c_2 \log\left(\frac{\frac{S}{S_0}}{w_s}\right) + c_3\left(\frac{S}{S_0}\right) \quad (14)$$

Model 10 [Hargreaves ve Riley, 1985];

$$\frac{H}{H_0} = c_1 * (\Delta T)^{0.5} + c_2 \quad (15)$$

Model 11 [Chen Model (Coppolino, 1994)];

$$\frac{H}{H_0} = c_1 * \ln(\Delta T) + c_2 \quad (16)$$

Model 12 [Bristow and Campbell, 1984];

$$\frac{H}{H_0} = c_1 * [1 - \exp\{-c_2 * (\Delta T)^{c_3}\}] \quad (17)$$

Model 13 [Külcü ve Ersan,2024];

$$\frac{H}{H_0} = c_1 * \log[(c_2 * {}^{S}/_{S_0}) + (c_3 * \Delta T)] + c_4 \quad (18)$$

Model 14 [Külcü ve Ersan, 2024];

$$\frac{H}{H_0} = c_1 * \log[(c_2 * w_s) + (c_3 * \Delta T)] + c_4 \quad (19)$$

Model 15 [Süslü ve Külcü, 2024]

$$\frac{H}{H_0} = c_1 * \left(\frac{S}{So} * w_s\right)^{c_2} + c_3 * \text{lon}10(1 + \Delta T) + c_4 * \sin(\varphi) * \cos(2\pi * n/365) + c_5 \quad (20)$$

Modellerin tahmin başarısını test etmekte kullanılan istatistiksel parametreler

ATATEK-Solar yazılımı modellerin tahmin yeteneklerinin karşılaştırılmasında RMSE (karekök hatası) ve R^2 (determinasyon katsayısı) parametrelerini kullanmaktadır. Hata parametrelerinin düşük olması modellerin tahmin ettiği verilerin ölçülen değerlere yakınlığını ifade ederken, determinasyon katsayısının yüksek olması değerler arasındaki korelasyonun güçlü göstermektedir.

BULGULAR VE TARTIŞMA

Çalışma kapsamında ATATEK-Solar yazılımına Adana iline dair veri girişleri yapılmış ve program ön hesaplama sonuçları sayfasında Adana ili için Şekil 1'de gösterilen verileri sunmuştur. Ön hesaplamalarda; gün uzunluğu, güneşlenme süresi (meteorolojik ölçüm verisi), atmosfer dışına bir metrekare alana gelen ışınım, yer yüzünde bir metrekare alana gelen ışınım (meteorolojik ölçüm verisi), gün batımı saat açısı, deklinasyon açısı, maksimum minimum sıcaklık farkı (meteorolojik ölçüm verisi) ve enlem derecesi verileri gösterilmektedir.



Ay	S (saat)	S0 (saat)	H (MJ/m²/gün)	H0 (MJ/m²/gün)	ws (°)	ΔT (°C)	Deklinasyon (°)	Enlem (°)
Ocak	4.5000	9.7698	7.1022	17.0639	73.2737	9.5000	-20.9170	36.9800
Şubat	5.3000	10.6700	9.6688	22.2402	80.0251	10.2000	-12.9546	36.9800
Mart	5.9000	11.7571	13.1846	28.7825	88.1780	11.1000	-2.4177	36.9800
Nisan	7.1000	12.9564	16.3384	35.3944	97.1727	11.9000	9.4149	36.9800
Mayıs	9.1000	13.9795	19.4567	39.8924	104.8462	12.5000	18.7919	36.9800
Haziran	10.5000	14.4962	20.9079	41.6611	108.7213	11.9000	23.0859	36.9800
Temmuz	10.7000	14.2623	21.0229	40.7029	106.9673	10.9000	21.1837	36.9800
Ağustos	10.2000	13.3838	19.2109	37.0619	100.3788	11.2000	13.4550	36.9800
Eylül	9.0000	12.2227	15.8694	31.1197	91.6704	12.9000	2.2169	36.9800
Ekim	7.3000	11.0244	11.9473	24.1206	82.6833	13.3000	-9.5994	36.9800
Kasım	5.8000	10.0066	8.2321	18.2552	75.0493	11.9000	-18.9120	36.9800
Aralık	4.3000	9.5084	6.2453	15.6256	71.3127	9.9000	-23.0496	36.9800

Şekil 1. ATATEK-Solar programı tarafından Adana ili için sunulan ön hesaplama verileri

Tablo 1. Modellerin istatistiksel analiz sonuçları

Model	RMSE	R^2	En iyi metot	Kaynak
Model 15	0.2074157897	0.9984233393	patternSearch	Süslü ve Külcü 2024
Model 13	0.2196217824	0.9982323127	nelderMead	Külcü ve Ersan, 2024
Model 6	0.2200843468	0.9982248587	nelderMead	Ampratwum and Dorvlo, 1999
Model 2	0.2233773908	0.9981713397	nelderMead	Elagib and Mansell, 2000
Model 5	0.2315402749	0.9980352481	patternSearch	Bahel et al., 1987
Model 1	0.2358254291	0.9979618512	nelderMead	Angstrom (1924
Model 8	0.2358254776	0.9979618504	patternSearch	Dogniaux and Lemoine
Model 7	0.2471816587	0.9977608298	nelderMead	Almorox and Hontoria, 2004
Model 9	0.2946146583	0.9968190025	nelderMead	Külcü, 2019
Model 4	0.3686456530	0.9950195010	patternSearch	Külcü, 2015
Model 14	0.5957168811	0.9869942790	patternSearch	Külcü ve Ersan, 2024
Model 12	0.8391237002	0.9741948378	nelderMead	Bristow and Campbell, 1984
Model 11	0.8600846868	0.9728895298	nelderMead	Chen Model (Coppolino, 1994
Model 10	0.8637428954	0.9726584208	nelderMead	Hargreaves ve Riley, 1985
Model 3	1.9841565010	0.8557198891	simulatedAnnealing	El-Metwally, 2005

Ön hesaplamalardan sonra ATATEK-Solar programında optimizasyon işlemine geçilmiştir. Optimizasyon işlemi sonucunda yazılım dört farklı metoda göre hesaplamaları yapmış modelleri başarı sıralamasına göre Tablo 1'de gösterildiği şekilde sunmuştur. Sıralamalarda RMSE değeri temel alınmıştır. Yapılan sıralamada Süslü ve Külcü (2024) tarafından geliştirilen Model 15 en başarılı sonucu vermiştir. Bu modeli Külcü ve Ersan (2024) tarafından geliştirilen Model 13 izlemektedir. İlk 8 model için hesaplanan RMSE değeri 0.25 seviyesinin altındadır. Bu modellerin R^2 değerleri ise %99.7 seviyesinin üzerindedir. Bu bağlamda ilk 8 modelin başarılı olduğu ancak Model 15 (Süslü ve Külcü, 2024) tarafından yapılan tahminlerin gerçek verileri daha doğru tahmin ettiği görülmüştür. Modellerin optimizasyonunda kullanılan en başarılı yöntemin farklı olduğu görülmektedir. Farklı optimizasyon yöntemlerinin denenmesinin modelleme başarısını arttırdığı değerlendirilmiştir.

Tablo 2. Optimizasyon işlemi sonucunda hesaplanan model sabitleri

Model	C1	c2	C3	C4	C5
Model 15	0.1942555816	3.0000000000	0.1590332164	-0.0154682607	Süslü ve Külcü 2024
Model 13	0.4719880262	10.0000000000	0.1000000028	0.0703094818	Külcü ve Ersan, 2024
Model 6	0.7171611010	-0.1646618290	0.6450835004		Ampratwum and Dorvlo, 1999
Model 2	-0.9999996529	1.5675545011	0.1212368204		Elagib and Mansell, 2000
Model 5	0.3409632887	-0.1146745594	0.9656775666	-0.6752476395	Bahel et al., 1987
Model 1	0.2970240206	0.2902144085			Angstrom (1924
Model 8	-0.9999998570	-0.0046855514	0.0350744826	0.4634402578	Dogniaux and Lemoine
Model 7	0.1885737933	0.1542989134			Almorox and Hontoria, 2004
Model 9	0.5374931749	0.1000000000	0.2549993474	0.1193486102	Külcü, 2019
Model 4	3.0000000000	0.1000000000	0.0029177400		Külcü, 2015
Model 14	0.6461403367	1.0000000000	4.8199468392	-0.9239052975	Külcü ve Ersan, 2024
Model 12	0.5170100462	0.0500000000	1.6577601322		Bristow and Campbell, 1984
Model 11	0.1453126331	0.1312668072			Chen Model (Coppolino, 1994
Model 10	0.0835062267	0.2028137639			Hargreaves ve Riley, 1985
Model 3	0.1942555816	3.0000000000	0.1590332164	-0.0154682607	El-Metwally, 2005

Tablo 2'de model optimizasyonu sonucunda hesaplanan model sabitleri gösterilmiştir. Model sabitleri formüllerde yerine konulduğunda aynı hesaplamalar yapılabilmektedir.

SONUÇ

Çalışma kapsamında Adana ili için global güneş ışınımı değerlerinin hesaplanmasında 15 farklı modelin ATATEK-Solar yazılımı aracılığıyla optimizasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda en başarılı modelin Süslü ve Külcü (2024) tarafından geliştirilen Model 15 ve ikinci modelin Külcü ve Ersan (2024) tarafından geliştirilen Model 13 olduğu tespit edilmiştir. Bu modeller için hesaplanan RMSE değerleri sırasıyla; 0.2074157897 ve 0.2196217824, R^2 değerleri ise 0.9984233393 ile 0.9982323127 olarak hesaplanmıştır.

SİMGELER

G_{sc}- Güneş sabiti 1367 W/m^2

H-Global aylık ortalama günlük ışınım (J/m^2.gün)

H_0- Atmosfer dışına yatay düzleme bir gün boyunca gelen ışınım (J/m^2.gün)

w_s- Gün batımı saat açısı

c-Model katsayıları

n-Gün sayısı

λ- Enlem açısı

δ- Deklinasyon açısı

S- Gün uzunluğu

S_o- Güneşlenme süresi

ΔT- Maksimum minimum sıcaklık farkı

KAYNAKLAR

Almorox, J., Bocco, M., & Willington, E. (2013). Estimation of daily global solar radiation from measured temperatures at Cañada de Luque, Córdoba, Argentina. *Renewable Energy, 60*, 382–387.

Ampratwum, D. B., & Dorvlo, A. S. S. (1999). Estimation of solar radiation from the number of sunshine hours. *Applied Energy, 63*, 161–167.

Angström, A. (1924). Solar and terrestrial radiation. Report to the international commission for solar research on actinometric investigations of solar and atmospheric radiation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 50*(210), 121–126.

Bahel, V., Bakhsh, H., & Srinivasan, R. (1987). A correlation for estimation of global solar radiation. *Energy, 12*, 131–135.

Bakırcı, K. (2009). Correlations for estimation of daily global solar radiation with hours of bright sunshine in Turkey. Energy, 34, 485–501.

Bristow, K. L., & Campbell, G. (1984). On the relationship between incoming solar radiation and daily maximum and minimum temperature. *Agricultural and Forest Meteorology, 31*(2), 159–166.

Coppolino, S. (1994). A new correlation between clearness index and relative sunshine. *Renewable Energy, 4*(4), 417–423.

Dogniaux, R., & Lemoine, M. (1983). Classification of radiation sites in terms of different indices of atmospheric transparency. *Solar Energy Research and Development in the European Community*, Series F, Vol. 2. Dordrecht, Holland: Reidel.

Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2006). *Solar engineering of thermal processes* (3rd ed.). New York: John Wiley & Sons.

Elagib, N., & Mansell, M. (2000). New approaches for estimating global solar radiation across Sudan. *Energy Conversion and Management, 41*(5), 419–434.

El-Metwally, M. (2005). Sunshine and global solar radiation estimation at different sites in Egypt. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 67*(14), 1331–1342.

Ersan, R., & Külcü, R. (2024). Development of new models using empirical modeling of global solar radiation and its application in Uşak city, Turkey. *Unpublished manuscript*.

Ertekin, C., & Yaldız, O. (2000). Comparison of some existing models for estimating global solar radiation for Antalya (Turkey). *Energy Conversion and Management, 41*, 311–330.

Ertekin, C., Külcü, R., & Evrendilek, F. (2008). Techno-economic analysis of solar water heating systems in Turkey. *Sensors, 8*, 1252–1277.

Hargreaves, G., & Riley, J. (1985). Irrigation water requirements for Senegal River basin. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 111*(3), 265–275.

Külcü, R. (2015). Modelling of solar radiation reaching the earth to Isparta province. *Süleyman Demirel University, Journal of the Faculty of Agriculture, 10*(1), 19–26.

Külcü, R. (2019). Development of a new model using empirical modeling of global solar radiation and its application in Çankırı city. *Süleyman Demirel University, Yekarum e-Dergi, 4*(2), 1–8.

Külcü, R., Süslü, A. (2024). Global Güneş Işınımı Tahmin Modelleri için ATATEK-Solar Yazılımının Geliştirilmesi. *Akademia Doğa ve İnsan Bilimleri Dergisi* 9(1).

Külcü R., Ersan, R. Development of New Models Using Empirical Modeling of Global Solar Radiation and Its Application in Usak City, Turkey. *Journal of Tekirdag Agricultural Faculty* Article in Press.

Mengeç, O., Ertekin, C., & Sonmete, M. H. (2006). Evaluation of global solar radiation models for Konya, Turkey. *Energy Conversion and Management, 47*, 3149–3173.

Prescott, J. (1940). Evaporation from a water surface in relation to solar radiation. *Transactions of the Royal Society of South Australia, 64*(1), 114–118.

BÖLÜM 11

Orta Anadolu'daki Kalsedon Oluşumlarına Örnekler

Meltem Gürbüz[1] & Başak Bektaş[2]

[1] Dr.Öğr.Üyesi, ME. Ü. Takı Teknolojisi ve Tasarımı Yüksekokulu, Çiftlikköy, 33343 Mersin
ORCID: 0000-0003-2501-0697
[2] ME.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Gemoloji Anabilimdalı, Çiftlikköy, 33343 Mersin
ORCID ID: 0009-0001-2700-703X

1. Giriş

Süstaşları, yer kabuğunda doğal olarak bulunan ve çıkarıldıktan sonra işlenerek çeşitli takı ve süs eşyası olarak kullanılan mineraller, taşlar ve organik malzemelerdir (Kaydu Akbudak vd., 2020). Bu malzemeler genellikle farklı renklerde olur ve insanlar tarafından estetik, simgesel ve kültürel anlamlar taşır (Kaydu Akbudak vd., 2017; 2023; Ekincioğlu vd., 2018).

Kalsedon (SiO_2) temel yapısına sahip, lifsi ve taneli mikrokristalen yapısında olan yaygın olarak süstaşı olarak değerlendirilen silis kuvars grubuna ait olup (Frondel, 1978; 1982) genellikle volkanik kayaçların boşluklarında oluşur. (Gilg vd., 2003; Çevik vd., 2011). Saydam veya yarı saydam bir yapısında olup mohs sertlik skalasında 6.5-7 arasında değişen bir sertliğe sahiptirler, ve mikrokristalen yapılarından dolayı oldukça dayanıklıdırlar. Yoğunlukları 2.58-2.64 g/cm3 arasında, kırılma indeksleri ise 1.53-1.54 arasında değişir (Schumann, 2005).

Kalsedon ve agat, yüzyıllardır insanlar tarafından hem süs eşyası olarak hem de çeşitli kültürel ve spiritüel inançlarda önemli bir yere sahip olmuştur. Kalsedon ve agat, tarih boyunca çeşitli kültürlerde süs eşyası, mühür ve tılsım olarak kullanılmıştır. Günümüzde ise bu mineraller, mücevherat ve sanatsal ürünlerin yapımında yaygın olarak kullanılmaktadır.

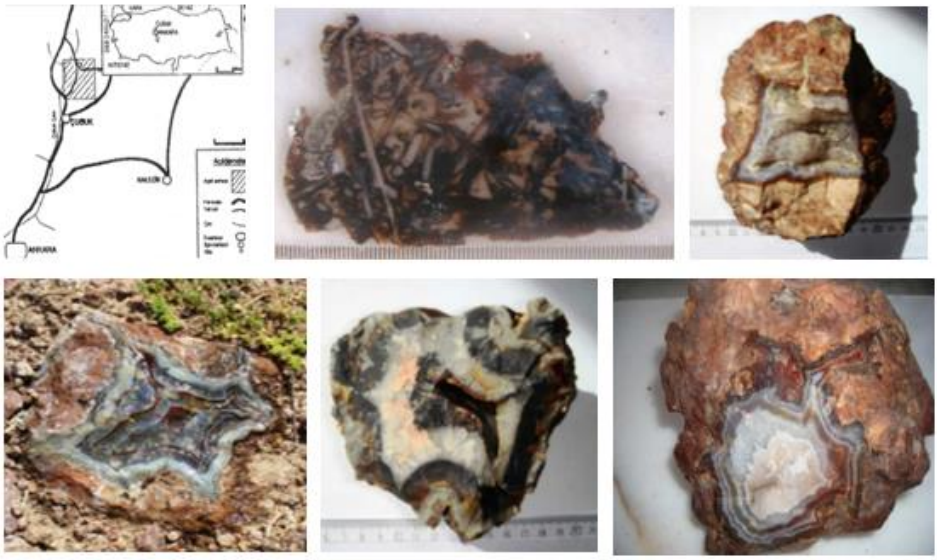
Anadolu'nun volkanik geçmişi, aktif tektonik hareketliliği, jeotermal aktiviteleri ve çeşitli erozyon süreçleri gibi doğal faktörleri silisli süstaşlarının oluşumlarında etkili olmuştur. Anadoludaki kalsedon ve agat örnekleri; ***Ankara, Eskişehir, Tokat, Yozgat ve Kütahya illerinde bulunmaktadır. Ayrıca Erzurum-Şenkaya, Afyon-Karakaya, Bursa-Orhaneli Büyükorhan, Çanakkale-Bayramiç, Ordu-Fatsa, İstanbul-Şile, Gümüşhane-Şiran Norşun, Rize-İkizdere, Giresun-Görele, Trabzon-Arşin Yanbolu*** yörelerinde de kalsedon ve agat oluşumları görülmektedir.

2. Ankara Çubuk İlçesi Agatları

Ankara'nın Çubuk ilçesinde bulunan çubuk agatları, andezitik ve riyolitik kayaçların çatlak sistemlerinde düzensiz nodüller halinde yer alır. Bu agatların oluşumu, 100-200°C sıcaklık ve yüzey koşullarına yakın basınçta, pH değeri 9'un altında gerçekleşen hidrotermal alterasyon ile olmuştur (Hatipoğlu ve Dora,1998).

Agatlar, farklı SiO_2 bantlarından oluşur ve çeşitli renklerde görülür. Konsantrik bantlanma ve lifli yapılar, jel safhasında oluşmuştur. Çubuk'ta Brezilya tipi agat, yıldırım yumurtası agat, amigdaloidal agat, Uruguay tipi agat, cam kafa

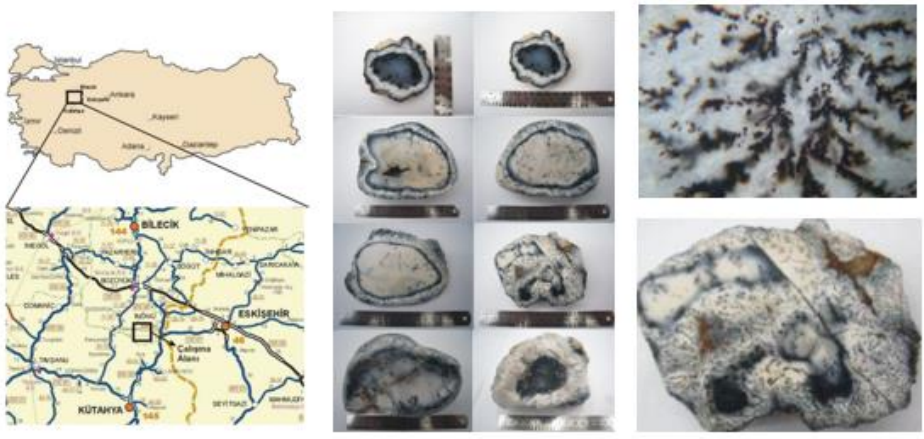
agat, tüp agat ve jeod agat gibi farklı agat tipleri bulunmaktadır (Şekil 1) (Daşçı, 2010).



Şekil 1. Ankara (Çubuk) Agat Örnekleri (Daşçı, 2010).

3. Eskişehir Dereyalak Köyü Agatları

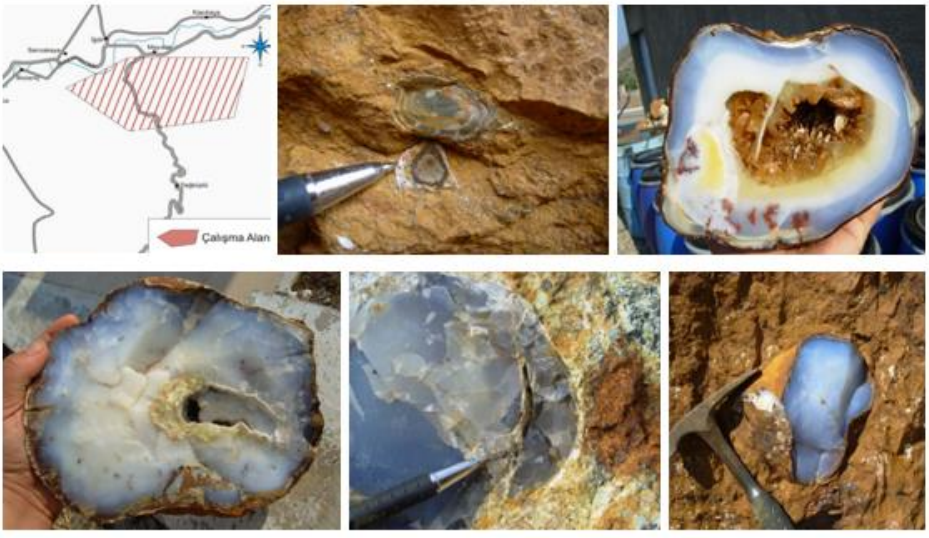
Eskişehir Dereyalak Köyü'nde bulunan agatlar, volkanik çakıltaşı birimlerinde düzensiz nodüller olarak yer almaktadır ve çapları 1-30 cm arasında değişmektedir. Yumrusal şekilli ve genellikle siyah ile beyaz tonlarında homojen renklere sahiptirler. Bölgedeki sepiolitlerin silisli çözeltilerle işlenerek dendritli agatlara dönüştüğü gözlemlenmiştir (Şekil 2). Bu agatların oluşumu, hidrotermal alterasyon ve kolloidal silis ile süslenme süreciyle ilişkilendirilmektedir. (Arzaoğulları, 2007).



Şekil 2. Eskişehir Dereyalak Köyü Dendritli Agat Örnekleri (Arzaoğulları, 2007).

4. Eskişehir Sarıcakaya İlçesi Kalsedonları

Eskişehir'in Sarıcakaya ilçesindeki Mayıslar Köyü'nde bulunan kalsedon sahası da, çeşitli renk tonlarında (kahverengi, sarımsı kahverengi, bal rengi, koyu mavi, gökyüzü mavisi, açık mavi) kalsedon yumrularına ev sahipliği yapmaktadır (Şekil 3). Bu yumruların çapları 10-15 cm aralığında olup, bazıları 60-70 cm'ye kadar ulaşabilmektedir (Yediçocuklu, 2009).



Şekil 3. Eskişehir- Sarıcakaya İlçesine Bağlı Mayıslar Köyü'nde Bulunan Kalsedon Oluşumları (Yediçocuklu, 2009).

5. Tokat Bölgesi Jasper

Tokat bölgesindeki jasper oluşumları, krizopras, agat, kuvars, ametist, opal ve ağaç opali gibi çeşitli mikrokristalin kuvars/kalsedon türlerini içerir. Bu taşlar kırmızı, kırmızımsı kahve, turuncu ve sarı renklerde olup, bazılarında simetrik agat bantları ve kalsedon bulunmaktadır (Şekil 4). Mineralojik olarak kuvars, moganit, götit, hematit, limonit, dolomit ve mika-illit içermektedir. Jasperler, sertliği, sağlamlığı, renk çeşitliliği ve cila alma kapasitesi ile süstaşı olarak değerli olup, takı ve tespih yapımında kullanılmaktadır (Arık ve Özen, 2020).



Şekil 4. Tokat İnceleme Alanındaki Jasper Örnekleri ve Jasperler ile Üretilen Süs Eşyaları (Arık ve Özen, 2020).

6. Tokat Almus İlçesi Agatları

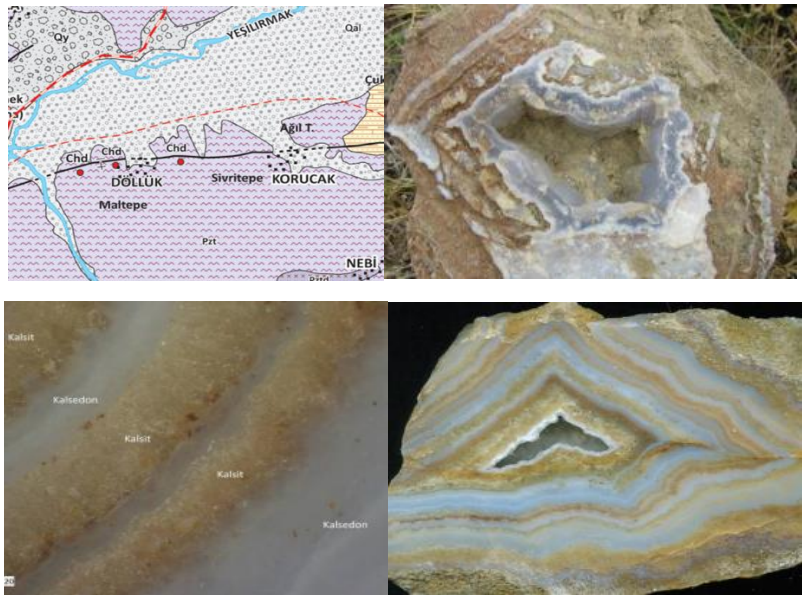
Türkiye'nin Tokat iline bağlı Almus ilçesinde bulunan Almus agatları, Eosen dönemindeki volkanik kayalar içerisinde oluşmuş, yumurta şeklinde ve genellikle küresel veya oval yapıda nodüler agatlardır. Boyutları birkaç santimetre ile 25-30 santimetre arasında değişmektedir (Başıbüyük vd., 2023). Bu agatlar, zebraik desenler gösteren kalsedon ve kuvars bantlarından oluşur ve renkleri ile dikkat çekmektedir. İçerdiği demir oksitler, kesildiğinde kırmızı, turuncu veya sarı renkli desenlerin ortaya çıkmasına neden olmaktadır (Şekil 5) (Arık vd., 2022).



Şekil 5. Almus Agat Örnekleri (Arık vd., 2022).

7. Tokat Döllük ve Gümenek Kalsedonları

Tokat ilindeki Döllük ve Gümenek bölgelerinde bulunan kalsedonlar, Paleozoyik dönemden kalan, metamorfik, magmatik ve sedimanter birimlerde yer almaktadır. Bu kalsedonlar, volkanik aktivitelerle ilişkili hidrotermal sistemlerin son ürünü olarak, rekristalize kireçtaşlarının çatlak ve boşluklarında oluşmuştur. Renkleri genellikle açık mavi, koyu mavi ve grimsi mavi tonlarında olup, damar dolgusu, yumrulu, bantlı ve dantelli yapılar şeklinde görülmektedir (Şekil 6) (Arık ve Ruşen, 2022).



Şekil 6. Tokat İli Döllük ve Gümenek Bölgelerindeki Kalsedon Oluşumları (Arık ve Ruşen, 2022).

8. Tokat Tepeyurt Jasper

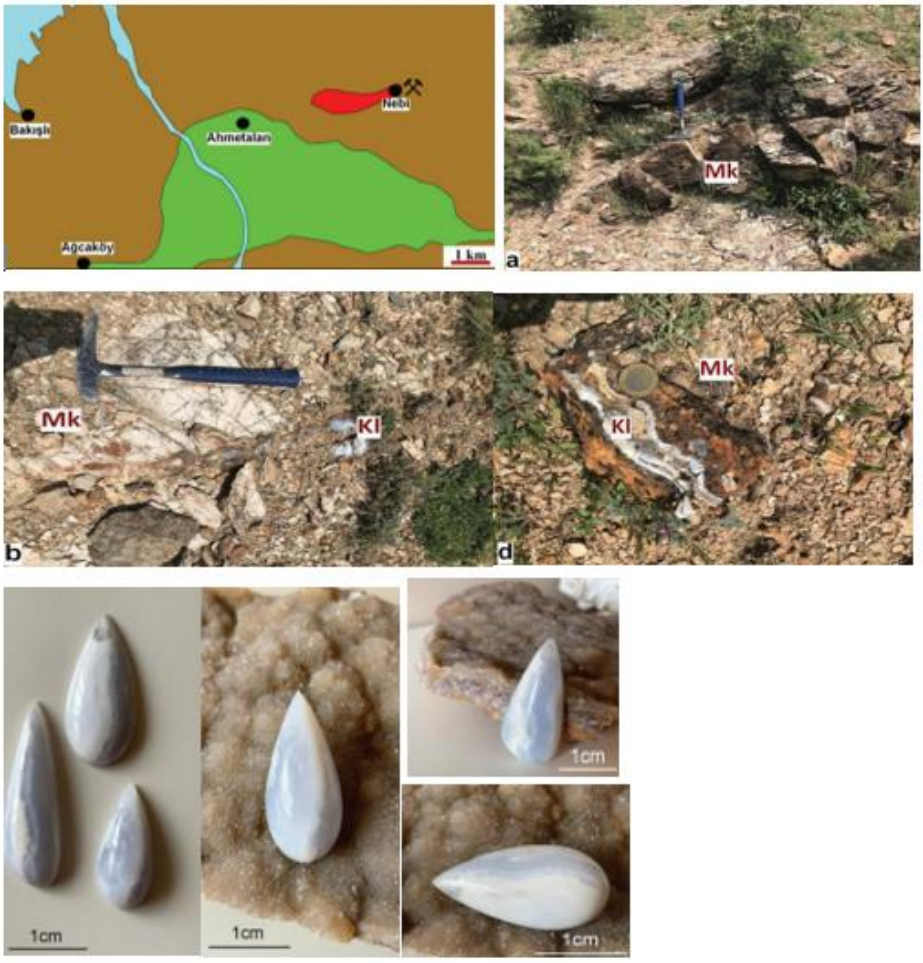
Tokat'ın Tepeyurt yaylasında bulunan jasperler geç triyas yaşlı yeşil renkli altere metavolkanik kayaçlar içerisinde hidrotermal aktivite sonucunda oluşmuştur. Jasperlerin boyutları genellikle birkaç cm'den 1,5 metreye kadar değişmekte olup, renkleri bünyesinde bulunan hematite bağlı olarak koyu kırmızı ve kahverengimsi kırmızıdır (Şekil 7) (Yüzbaşıoğlu ve Kaydu Akbudak, 2024).



Şekil 7. Tokat Tepeyurt Bölgesi Jasper Örnekleri (Yüzbaşıoğlu ve Kaydu Akbudak, 2024).

9. Tokat Nebiköy Kalsedonları

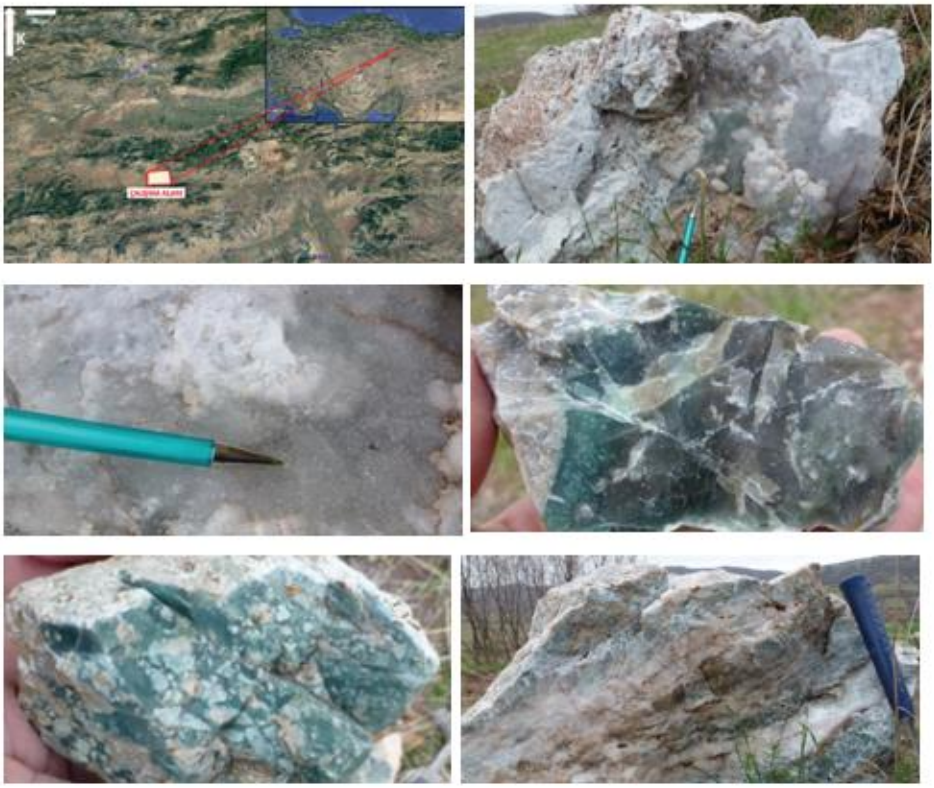
Tokat Nebiköy bölgesinde bulunan kalsedonlar, Permiyen-Triyas yaşlı metamorfik kayaçlar içerisinde damarlar halinde bulunmaktadır. Genellikle açık mavi-mavi tonlarında renge sahip olan kalsedonlar, mavi, gri ve diğer renk tonlarında ve ince bantlı yapıdadır. Ayrıca safsızlıkları sebebiyle doğada farklı renk ve desenler oluşturmaktadır (Şekil 8). Kalsedonlar, ortalama 120°C sıcaklıkta kayaç boşluk ve çatlaklarında silisli çözeltilerin çökelmesiyle oluşurlar. Doğada masif, sarkıt, yumrulu şekillerde veya düz, yuvarlak, pürüzsüz şekillerde bulunmaktadırlar (Candan, vd., 2022).



Şekil 8. Tokat Nebiköy Kalsedon Örnekleri (Candan, vd., 2022).

10. Tokat Artova Kalsedonları

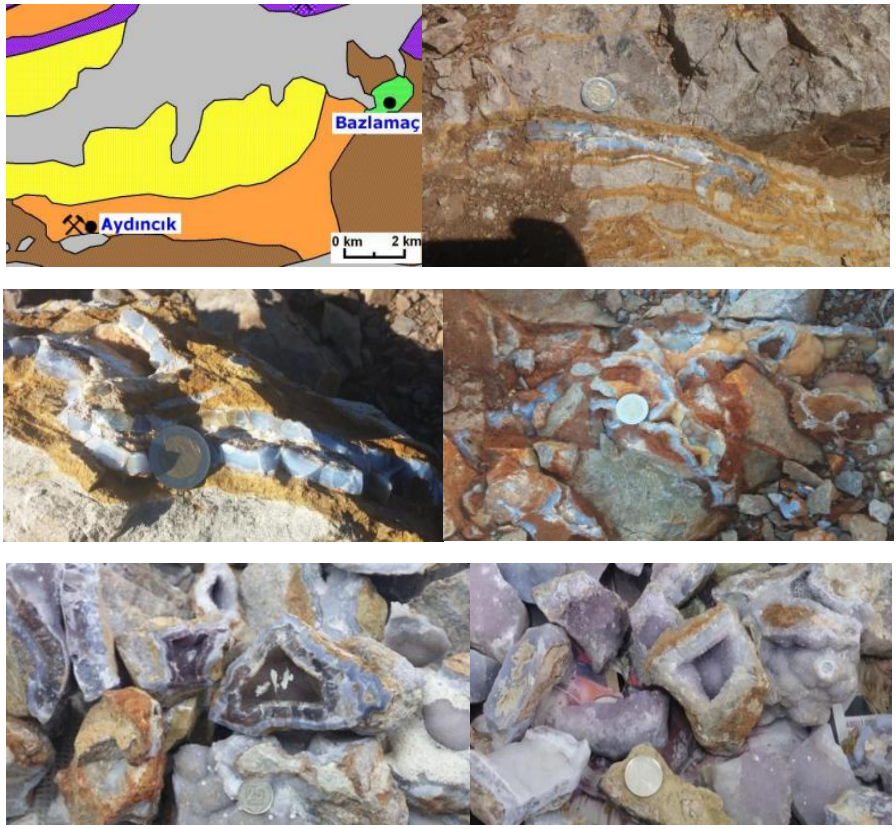
Tokat-Artova bölgesinde bulunan kalsedonların genellikle kuvars, tridimit ve dolomit minerallerinden oluştuğu belirlenmiştir. Ayrıca, yeşil kalsedonların yüksek krom içeriğine sahip olduğu ve bu nedenle "Kromlu Kalsedon" olarak tanımlandığı tespit edilmiştir (Başıbüyük vd., 2020). Bazı örneklerin druzy tipi küçük kuvars kristalleri içerdiği ve agat oluşumları bulunduğu gözlenmiştir. Bu özellikler, kalsedonların takı ve süstaşı üretimi için uygun olduğunu göstermektedir (Şekil 9) (Sözeri vd., 2022).



Şekil 9 Tokat Artova Kalsedon Örnekleri (Sözeri vd., 2022).

11. Yozgat Aydıncık Kalsedonları

Yozgat Aydıncık bölgesindeki kalsedon oluşumları, altere andezitlerdeki kırık çatlak ve gözeneklerde kalsiyumca zengin suların oluşturdukları ikincil kalsit dolgularının içerisinde gelişmiştir. Bu oluşumlar, küçük boyutlara sahip olup farklı renk ve kristal tane boyutlarına sahiptir. Bazı örneklerde böbreğimsi ve bantlı yapılar ile jeod oluşumları da gözlenmiştir. Ayrıca, kalsedonlar yer yer iri kristalli kuvars ve ametistlerle birliktelik göstermektedir (Şekil 10). Bu oluşumlar, altere andezitlerde gelişmiş breşler içerisinde bulunmaktadır (Kaydu Akbudak vd., 2018; Başıbüyük 2018).



Şekil 10. Yozgat Aydıncık Bölgesindeki Kalsedon Oluşumları (Kaydu Akbudak vd., 2018).

12. Yozgat Yerköy-Belkavak Köyü Kalsedonları

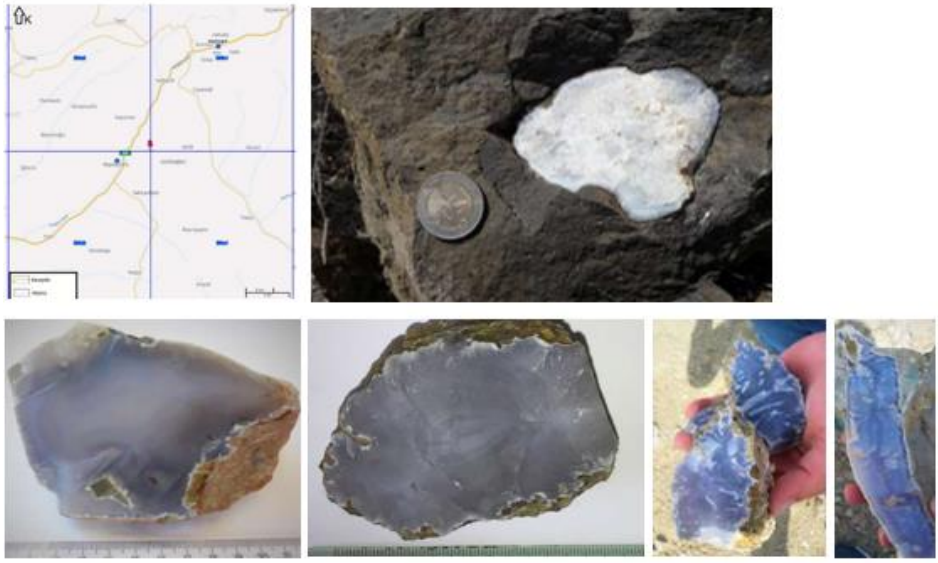
Yozgat-Yerköy-Belkavak Köyü civarında bulunan kalsedon oluşumları, genellikle andezit, altere andezit ve killeşmiş camsı tüfler içinde bulunmakta ve silis damarları şeklinde görülmektedir (Şekil 11). Oluşumları sırasında silisli çözeltilerin ısısının 200°C'lerden 370°C'lere kadar çıktığı ve sonra 120°C'lere kadar düştüğü gözlemlenmiştir. Ayrıca, kalsedon oluşumları sırasında genellikle %8'in altındaki tuzluluk oranları, meteorik suların etkili olduğunu göstermektedir. Bu oluşumların riyodasit/dasit volkanizmasından sonraki artık silisli çözeltilerin sığ denizel fasiyesten sonra karasal ortam koşullarında kırık ve çatlaklara yerleştiği düşünülmektedir (Çevik vd., 2011).



Şekil 11. Yozgat-Yerköy-Belkavak Köyü Kalsedon Örnekleri (Çevik vd., 2011)

13. Yozgat Başıbüyüklü Kalsedonları

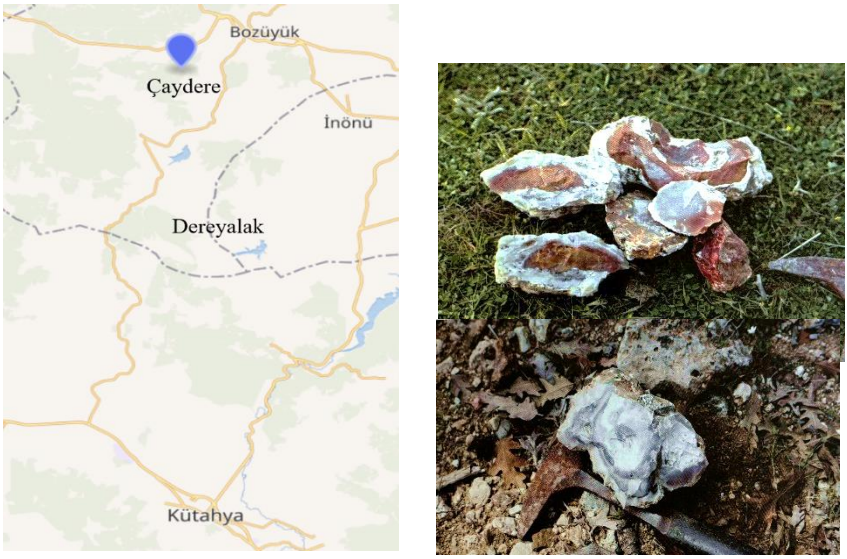
Yozgat Başıbüyüklü kalsedonları, genellikle ince bantlı yapılı, mavi ve gri renkli damarlar veya boşluk dolguları şeklinde oluşmaktadır (Şekil 12). Bu oluşumlar, Eosen yaşlı bazaltik karakterli volkanik kayaçların çatlak ve boşluklarında kalsedon, kuvars, zeolit ve kalsit gibi ikincil minerallerin oluşmasıyla meydana gelmektedir. Kalsedonlar, genellikle bazaltların çatlak ve gözeneklerinde oluşur ve kalsiyumca zengin suların oluşturduğu ikincil kalsit mineralleriyle birlikte bulunabilmektedir. Oluşum sıcaklıkları genellikle 150-180°C arasındadır (Güney, 2021).



Şekil 12. Yozgat Başıbüyük Köyü Kalsedon Örnekleri (Güney, 2021)

14. Kütahya Çaydere Agatları

Kütahya'nın kuzeyinde yer alan Çaydere mevkindeki agat oluşumları metamorfik temel birimleri içerisindeki çatlak-fisürlere yerleşen, sıcak suların getirisiyle bu çatlakları dolduran kuvars damarlarımın soğumasıyla oluşmuştur. Buradaki agat oluşukları yeşil-koyu ve yeşil-sarı renklerde opallerle beraber bulunmaktadır. Kütahya'nın kuzeydoğusunda yer alan Doğluşah Köyü'nde de agat, volkanitlerin geniş yayılımı arasında kuvars damarları şeklinde bulunmaktadır. Bu agat oluşukları genelde kırmızı-pembe ve sarı-kirli beyaz renklerdedir. (Şekil 13) (Selim, 2015).



Şekil 13. Kütahya- Çaydere ve Doğluşah Bölgesi Kalsedonları (Selim, 2015).

KAYNAKLAR

Arık, F., Özen, F. (2020). "Tokat yöresi Jasper Oluşumlarının mineralojik-petrografik, jeokimyasal özellikleri ve süstaşı olarak kullanılabilirliği." NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. 9(1): pp. 451-460.

Arık, F., Ruşen, A. (2022). "Döllük ve Gümenek (Tokat-Türkiye) Kalsedonlarının Jeokimyasal Özellikleri." Türkiye Jeoloji Bülteni, 65:3, pp. 255-272.

Arık, F., Turhal E. Ve Özen, Y. (2022) "Almus (Tokat) Yöresindeki Akiklerin Jeokimyasal Özelliklerinin Değerlendirilmesi.". Türkiye Jeoloji Bülteni, 65:3, pp. 233-254.

Arzaoğulları, U. (2007). Dereyalak Köyü (Eskişehir) Çevresinde Agat ve Opal Oluşumlarının Jeolojisi ve Ekonomik Koşulları Yüksek Lisans Tezi. Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Çanakkale, Türkiye.

Başıbüyük, Z. (2018). Mineralogical, geochemical, and gemolo-gical characteristics of silicic gemstone in Aydıncık (Yozgat-Turkey). Arabian Journal of Geosciences, 11, 1-11.

Başıbüyük, Z., Gürbüz, M., & Kaydu Akbudak, İ., 2023. Surprise eggs, the miracle of nature: almus agates (Tokat–Turkiye). Gospodarka Surowcami Mineralnymi, Vol 39, Issue 1, Pp. 5–22.

Başıbüyük, Z., Kaydu Akbudak, İ., & Gürbüz, M. 2020. Minera-logical, geochemical and gemological investigation of Artova Ch-chalcedonies, Tokat–Turkey. Gospodarka surowcami mine-ralnymi, Vol 36, Issue 1, Pp 77–92.

Candan, E. O., Kaydu Akbudak, İ., Başıbüyük, Z., & Ekincioğlu, G. 2022. Tokat Nebiköy Kalsedonlarının Mineralojik-Petrografik ve Gemolojik İncelemesi. Türkiye Jeoloji Bülteni, 65(3), 287-296.

Çevik, N., Ayan, Z., Coşkun, E. ve Sayılı, İ. S. (2011). Belkavak Köyü (Yerköy-Yozgat) Civarındaki Kuvars ve Ametist Oluşumlarında Mikrotermometrik Özellikler. Türkiye Jeoloji Bülteni, 54(3), 123-139.

Daşçı, P. Ş. (2010). Çubuk (Ankara) Yöresi Agatlarının Mineralojik Özelliklerinin İncelenmesi ve Süstaşı Olarak İşlenebilirliğinin Araştırılması Yüksek Lisans Tezi. Mersin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Mersin, Türkiye.

Ekincioğlu, G., Başıbüyük, Z., Gölbaş, A., & Kaydu Akbudak, İ. (2018). Geçmişten Günümüze Doğaltaş Mozaik Sanatı ve Geleceğe Aktarılması. International Journal of Interdisciplinary and Intercultural Art, 3(4), 81-91.

Frondel, C. (1978). Characters of quartz fibers. American Mineralogist, 63, 17-27.

Frondel, C. (1982). Structural hydroxyl in chalcedony (type B quartz). American Mineralogist, 67, 1248-1257.

Gilg, H. A., Morteani, G., Kostitsyn, Y., Preinfalk, C., Gatter, I. & Strieder, A. J. (2003). Genesis of amethyst geodes in basaltic rocks of the Serra Geral Formation (Ametista do Sul, Rio Grande do Sul, Brasil): a fluid inclusion, REE,

oxygen, carbon, and Sr isotope study on basalt, quartz, and calcite. Mineralium Deposita, 38, 1009-1025.

Güney, H. (2021). Başıbüyüklü (Yozgat) Kalsedonlarının Mineralojik, Jeokimyasal ve Gemolojik İncelemesi Doktora Tezi. Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Kütahya, Türkiye.

Hatipoğlu, M., ve Dora O.Ö., (1998). "Ankara-Çubuk Agatları ve Kapanımlarının Mineralojisi ve Oluşumlarının İncelenmesi." Hacettepe Yerbilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezi Bülteni.

Kaydu Akbudak, İ., Başibüyük, Z., & Ekincioğlu, G., (2020). Mineralogical-Petrographical Investigation and Usability as the Gemstone of the North Anatolian Kammererite, Tokat, Turkey. In Mineralogy-Significance and Applications (p. 65). IntechO-pen.

Kaydu Akbudak, İ., Başıbüyük, Z., Ekincioğlu, G., & Ekdur, E., (2023). Kırşehir Ve Aksaray Bölgesi Bantlı Traverten Oluşumlarının Süstaşı Olarak Kullanımı. Uluslararası Disiplinlerarası ve Kültürlerarası Sanat, 8(16), 1-12.

Kaydu Akbudak, İ., Başıbüyük Z. ve Gündüz, M. (2018). " Yozgat "Aydıncık" kalsedon-ametist oluşumlarının mineralojisi-petrografisi ve ekonomikliliğinin incelenmesi." DÜMF, Mühendislik Dergisi 9:1 pp. 313-324.

Kaydu Akbudak, İ., Gölbaş, A., & Başıbüyük, Z., 2017. Kırşehir Müzesi Envanterinde Bulunan Yüzüklerin Arkeogemolojik Ve Jeoarkeolojik İncelemesi. Journal of International Social Rese-arch, 10(52).

Schumann, W. (2005). Gemstones of the Worlds, Sterling, ISBN-10 : 071980051X, New York, USA.

Selim H (2015) Türkiye'nin Değerli Ve Yarı Değerli Mücevher Taşları, İstanbul Ticaret Odası Yayınları, Yayın No:2014-4, İstanbul, 102s

Sözeri, K., Günel, H. ve Duran, E. (2022). "Tokat-Artova Bölgesinde Bulunan Kalsedon Oluşumlarının Mineralojik-Petrografik ve Gemolojik Özellikleri." Türkiye Jeoloji Bülteni, 65:3, pp. 273-286.

Yediçocuklu, A. (2009). Sarıcakaya (Eskişehir) Kalsedon ve Güğü Köyü (Balıkesir) Ametist Madenciliğinde En Uygun Üretim Tekniklerinin Geliştirilmesi Yüksek Lisans Tezi. Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, Türkiye.

Yüzbaşıoğlu, T. Y., & Kaydu Akbudak, İ. (2024). Mineralogical Characteristics and Their Usability as Gemstones of Jaspers in Altered Metavolcanics Belonging to the Topçam Formation, Tokat, Turkiye. Minerals, 14(11), 1072.

BÖLÜM 12

Mn Katkılı ZnO-TiO_2 Çekirdek-Kabuk Nanokompozitlerin Yapısal, Optik ve Fotokatalitik Özelliklerinin İncelenmesi: Eriochrome Black T'nin Bozundurulmasında Yeni Yaklaşımlar

***Meltem Gürbüz*[1,2]**

[1] Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Temel Mühendislik Bilimleri Bölümü, 58140 Sivas, Türkiye, ORCID: 0000-0002-3238-8789
[2] Nanofotonik Araştırma ve Uygulama Merkezi, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, 58140 Sivas, Türkiye

1. Giriş

Su kirliliği, modern toplumların karşı karşıya kaldığı en önemli çevresel sorunlardan biridir ve bu sorunun çözümü için etkili arıtma teknolojilerine ihtiyaç duyulmaktadır [1]. Fotokatalitik prosesler, özellikle organik kirleticilerin bozundurulması amacıyla, çevre dostu ve sürdürülebilir bir çözüm sunan teknolojiler arasında öne çıkmaktadır [2]. ZnO [3] ve TiO_2 [4]gibi geniş bant aralığına sahip yarı iletkenler, fotokatalizör olarak yaygın bir şekilde kullanılmakta olup, yüksek oksidasyon potansiyelleri ve kimyasal stabiliteleri ile dikkat çekmektedir. Bununla birlikte, ZnO-TiO_2 tabanlı fotokatalizörlerin verimliliği, dar bant aralığına sahip fotonların etkin bir şekilde absorbe edilememesi nedeniyle sınırlı kalmaktadır.

Bu problemi aşmak için metal katkılama yöntemleri, yarı iletkenlerin enerji bant aralığını daraltarak, görünür ışık altında daha etkin bir fotokatalitik performans elde edilmesini sağlayabilmektedir. Mn katkısı, ZnO-TiO_2 kompozitlerinin optik ve yapısal özelliklerini değiştirerek, fotokatalitik aktivitelerini artırma potansiyeli taşıyan bir strateji olarak öne çıkmaktadır [5]. Mn iyonlarının ZnO-TiO_2 matrisine entegrasyonu, malzemenin yüzey özelliklerini iyileştirirken, enerji bant yapısında da önemli değişikliklere neden olmaktadır [6].

Bu çalışmada, Mn katkılı ZnO-TiO_2 çekirdek-kabuk nanokompozitlerinin yapısal, optik ve fotokatalitik özellikleri incelenmiştir. Çalışmanın yenilikçi yönü, yaygın olarak kullanılan boyar maddeler yerine Eriochrome Black T (EBT) kullanılarak fotokatalitik bozunma performansının değerlendirilmesidir. EBT, su arıtma uygulamalarında nadiren kullanılan bir organik azo boya olup, Mn katkısının ZnO-TiO_2 kompozitlerinin fotokatalitik aktivitesine olan etkisini daha iyi değerlendirmek amacıyla tercih edilmiştir. Bu yaklaşım, ZnO-TiO_2 fotokatalizörlerin performansını geniş bir kirletici yelpazesi karşısında test etmeye yönelik önemli bir katkı sağlamaktadır. Çalışma kapsamında, farklı Mn konsantrasyonları (%0, %3, %5, %7, %10) kullanılarak sentezlenen nanokompozitler detaylı bir şekilde karakterize edilmiş ve fotokatalitik aktiviteleri incelenmiştir.

2. Materyaller ve Deneysel Yöntem

2.1. Materyaller: Bu çalışmada kullanılan kimyasal maddeler analitik saflıkta olup, $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$, TiO_2 (nano toz), $Mn(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$, NaOH ve organik boyar madde olarak Eriochrome Black T (EBT) temin edilmiştir. Tüm kimyasal maddeler herhangi bir ek saflaştırma işlemine tabi tutulmadan kullanılmıştır. Saflaştırılmış su (18 MΩ cm) çözücü olarak tercih edilmiştir.

2.2. Mn Katkılı ZnO-TiO_2 Nanokompozitlerin Sentezi: Mn katkılı ZnO-TiO_2 çekirdek-kabuk nanokompozitler, sol-jel yöntemi kullanılarak sentezlenmiştir. Bu süreçte, 2.97 g $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ ve 0.5 g TiO_2 nano tozu, 100 mL saf su içinde çözülmüş ve homojen bir karışım elde edilene kadar manyetik karıştırıcıda karıştırılmıştır. pH değerini 10'a ayarlamak amacıyla, karışıma damla damla NaOH çözeltisi eklenmiştir. pH düzenlemesi sırasında karışım sürekli karıştırılarak çözelti jelleşmeye başlayana kadar işleme devam edilmiştir. %0, %3, %5, %7 ve %10 Mn katkısı sağlamak için, sırasıyla 0 g, 0.15 g, 0.25 g, 0.35 g ve 0.50 g $Mn(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$ eklenmiştir. Karışım, jel formunu aldıktan sonra 80°C'de 24 saat süreyle kurutulmuş ve ardından 400°C'de 2 saat süreyle tavlanarak kristal yapının oluşumu sağlanmıştır. Bu işlem sonucunda farklı Mn konsantrasyonlarına sahip ZnO-TiO_2 çekirdek-kabuk nanokompozitler elde edilmiştir.

2.3. Karakterizasyon: Sentezlenen nanokompozitlerin yapısal ve optik özelliklerini belirlemek amacıyla çeşitli analizler gerçekleştirilmiştir. Parçacık boyutları ve kristal yapısı, X-ışını kırınımı (XRD) analizleri ile incelenmiştir. Yüzey alanı analizleri, Brunauer-Emmett-Teller (BET) yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiş ve Mn katkısının nanokompozitlerin yüzey alanı üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Enerji bant aralığı, UV-vis spektroskopisi ile ölçülmüş ve Tauc yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır.

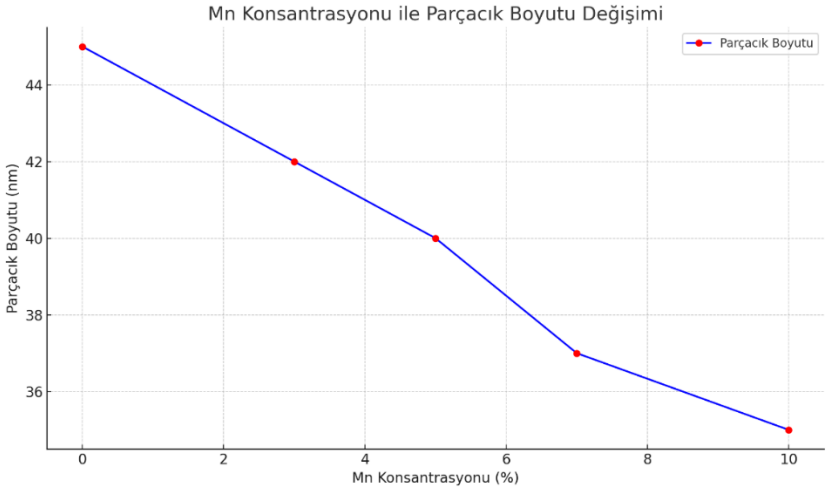
2.4. Fotokatalitik Aktivite Testleri: Fotokatalitik aktivite testleri, Eriochrome Black T (EBT) boyar maddesinin bozunması üzerine odaklanmıştır. Fotokatalitik testler için, 100 mL, 10 ppm konsantrasyona sahip EBT çözeltisi hazırlanmış ve üzerine 0.1 g fotokatalizör eklenmiştir. Çözelti, 30 dakika boyunca karanlık ortamda karıştırılarak fotokatalizörün yüzeyine EBT moleküllerinin adsorpsiyonu sağlanmıştır. Ardından, çözeltiye UV lambası altında ışık uygulanmış ve fotokatalitik reaksiyon başlatılmıştır. Reaksiyon boyunca her 15 dakikada bir 3 mL'lik örnekler alınmış ve bu örnekler santrifüjlenerek fotokatalizör ayrılmıştır. EBT'nin bozunma miktarı, UV-vis spektroskopisi kullanılarak, 535 nm'deki maksimum absorpsiyon piki üzerinden belirlenmiştir. Elde edilen veriler, % bozunma hesaplamaları yapılarak değerlendirilmiştir. Fotokatalitik aktivite, 90 dakikalık süre boyunca elde edilen bozunma yüzdesine göre analiz edilmiştir.

2.5. Veri Analizi: Elde edilen tüm veriler, fotokatalitik aktivitenin Mn konsantrasyonuna bağlı olarak nasıl değiştiğini göstermek amacıyla grafikler halinde sunulmuş ve analiz edilmiştir. Parçacık boyutu, enerji bant aralığı

ve yüzey alanı ile fotokatalitik bozunma yüzdesi arasındaki ilişkiler yorumlanmıştır. Bu analizler, Mn katkısının ZnO-TiO_2 nanokompozitlerin yapısal, optik ve fotokatalitik özellikleri üzerindeki etkisini daha iyi anlamaya yönelik olarak gerçekleştirilmiştir.

3. Bulgular ve Tartışma

Çalışmada, ZnO-TiO_2 çekirdek-kabuk nanokompozitlerin farklı Mn konsantrasyonları (%0, %3, %5, %7, %10) ile sentezlenmesi sonucunda elde edilen parçacık boyutları incelenmiştir (Şekil 1). Şekil 1'de, Mn konsantrasyonunun artışıyla birlikte parçacık boyutunda belirgin bir azalma olduğu görülmektedir.



Şekil 1. ZnO-TiO_2 çekirdek-kabuk nanokompozitlerin farklı Mn konsantrasyonları (%0, %3, %5, %7, %10) ile sentezlenmesi sonucunda elde edilen parçacık boyutları.

Mn katkı oranı %0'dan %10'a çıkarıldığında, parçacık boyutu yaklaşık 45 nm'den 35 nm'ye düşmüştür. Bu değişim, Mn iyonlarının ZnO-TiO_2 matrisine entegrasyonu sırasında meydana gelen yapısal ve fiziksel süreçlerle açıklanabilir.

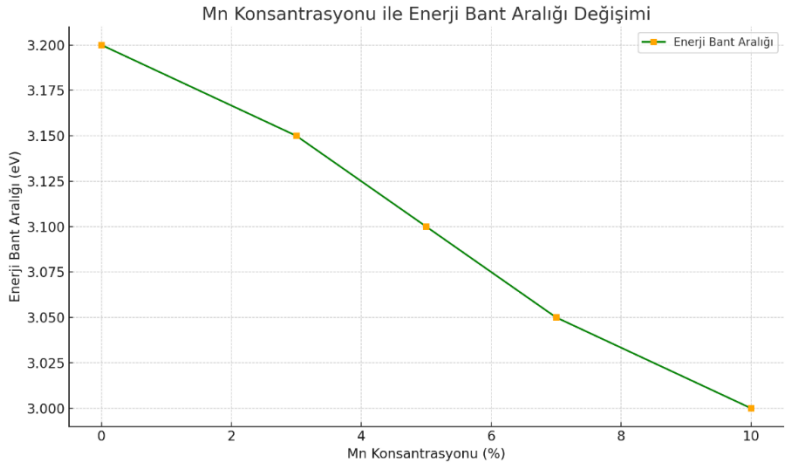
Mn iyonlarının ZnO-TiO_2 yapısına dahil edilmesi, çekirdeklenme sürecini hızlandırarak daha küçük ve homojen parçacıkların oluşumuna neden olmuştur. Mn katkısının artmasıyla birlikte çekirdeklenme sayısının artması, büyüme sürecinin sınırlanmasına ve daha küçük boyutlu partiküllerin oluşmasına yol açmıştır. Bu durum, ZnO-TiO_2 yapısında Mn iyonlarının oluşturduğu kristal gerilmeleri ve yüzey enerjilerinin artması ile ilişkilidir. Mn iyonları, ZnO matrisindeki atomlarla

etkileşime girerek kristal yapı içerisinde gerilmeler oluşturur ve bu da partikül büyümesini sınırlar.

Şekil 1'de görülen eğilim, daha küçük boyutlu parçacıkların yüzey alanının artmasına neden olmaktadır. Küçülen parçacık boyutu, birim hacimde daha fazla yüzey alanı sağlayarak fotokatalitik reaksiyonların gerçekleşme hızını artırır. Özellikle, %10 Mn katkılı numunede gözlemlenen yaklaşık 35 nm'lik parçacık boyutu, fotokatalitik aktivitenin artırılması açısından avantaj sağlamaktadır. Bu küçülme, ışık absorpsiyonunu artırarak daha fazla fotonun yüzey tarafından emilmesine ve dolayısıyla daha etkin bir fotokatalitik süreç gerçekleşmesine olanak tanımaktadır.

Artan Mn konsantrasyonu ile elde edilen parçacık boyutundaki küçülme, fotokatalitik performans üzerindeki olumlu etkileriyle de dikkat çekmektedir. Daha küçük partikül boyutları, ZnO-TiO_2 nanokompozitlerin ışık absorpsiyon yeteneğini artırır ve bu da elektron-hol çiftlerinin oluşumunu teşvik ederek fotokatalitik bozunma reaksiyonlarının verimliliğini artırır. Şekil 1'deki veriler, ZnO-TiO_2 fotokatalizörlerin etkinliğinin optimize edilmesi için Mn katkısının dikkatli bir şekilde ayarlanması gerektiğini göstermektedir.

Bu çalışmada, ZnO-TiO_2 çekirdek-kabuk nanokompozitlerde farklı Mn konsantrasyonlarının (%0, %3, %5, %7, %10) enerji bant aralığı üzerindeki etkisi incelenmiştir (Şekil 2).



Şekil 2. ZnO-TiO_2 çekirdek-kabuk nanokompozitlerde farklı Mn konsantrasyonlarının (%0, %3, %5, %7, %10) enerji bant aralığı üzerindeki etkisi.

Şekil 2, artan Mn katkısıyla birlikte enerji bant aralığında belirgin bir azalma olduğunu göstermektedir. Mn konsantrasyonu %0'dan %10'a çıkarıldığında, enerji bant aralığı yaklaşık 3.20 eV'den 3.00 eV'ye düşmektedir. Bu daralma, Mn katkısının ZnO-TiO_2 yapısının elektronik özelliklerine olan etkisiyle açıklanabilir.

Artan Mn katkısının enerji bant aralığını daraltmasının temel nedeni, Mn iyonlarının ZnO-TiO_2 yapısına entegre olarak malzeme içinde yeni ara enerji seviyeleri oluşturmasıdır. Mn iyonları, ZnO-TiO_2 matrisine katıldığında, valans bandı ve iletkenlik bandı arasında ekstrinsik enerji seviyeleri oluşturarak bu enerji farkını azaltmaktadır. Sonuç olarak, malzemenin elektronik yapısında değişiklik meydana gelir ve daha düşük enerjili fotonların absorpsiyonu mümkün hale gelir. Bu durum, daha geniş bir ışık spektrumunda ışık absorpsiyonu sağlayarak, nanokompozitin fotokatalitik özelliklerini iyileştirmektedir.

Ayrıca, Mn katkısı, ZnO-TiO_2 kristal yapısında yapısal gerilmeler oluşturur. Mn iyonlarının ZnO ve TiO_2 kristal kafesinde yer alması, kafes yapısında bozulmalara ve lokal gerilimlere neden olur. Bu yapısal gerilmeler, bant yapısını değiştirerek enerji bant aralığında daralmaya yol açmaktadır. Özellikle yüksek Mn konsantrasyonlarında (%7 ve %10), bu yapısal değişikliklerin etkisi daha belirgin hale gelir ve bant aralığındaki düşüşü destekler.

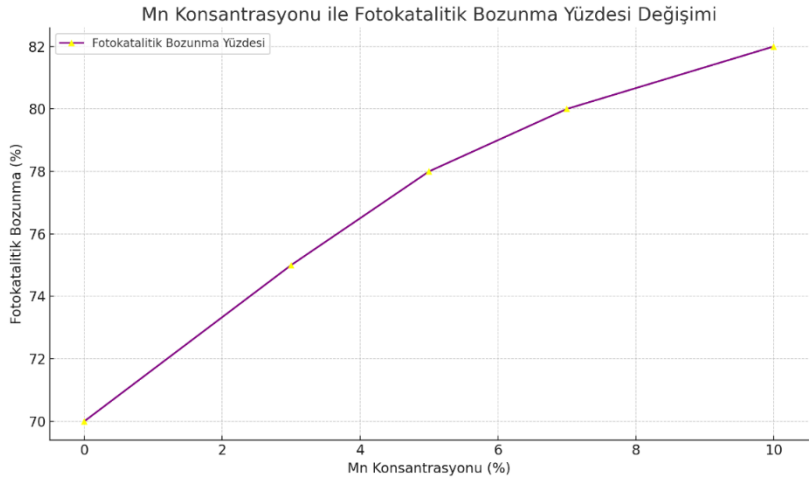
Bant aralığındaki bu daralma, ZnO-TiO_2 nanokompozitlerin fotokatalitik aktivitesi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Dar bant aralığı, görünür ışık absorpsiyonunu artırarak daha geniş bir ışık spektrumunda fotonların emilmesine olanak tanır. Bu sayede, elektron-hol çiftlerinin oluşumu teşvik edilerek fotokatalitik süreçlerde reaksiyon verimliliği artar. Artan Mn katkısının enerji bant aralığını daraltması, ZnO-TiO_2 nanokompozitlerin görünür ışık altında daha etkin bir fotokatalizör olarak çalışmasını sağlar. Bu durum, organik kirleticilerin bozunma sürecinde daha yüksek verimlilik sağlanmasına katkıda bulunur.

Özellikle %10 Mn katkılı ZnO-TiO_2 numunesinde gözlemlenen yaklaşık 3.00 eV'lik bant aralığı, malzemenin ışık absorpsiyon kapasitesini artırmakta ve fotokatalitik verimliliğin yükselmesine olanak tanımaktadır. Daralan bant aralığı, nanokompozitin daha düşük enerjili fotonları absorbe etmesini sağlayarak fotokatalitik reaksiyonların hızını artırır. Bu nedenle, Mn katkısının uygun seviyelerde yapılması, ZnO-TiO_2 nanokompozitlerin fotokatalizör olarak kullanımını optimize etmek için önemli bir parametre olarak öne çıkmaktadır.

Bu bulgular, Mn katkısının ZnO-TiO_2 yapılarının optik ve elektronik özelliklerini değiştirerek, fotokatalitik performansı iyileştirebileceğini göstermektedir. Şekil 2'de sunulan sonuçlar, Mn katkısının dikkatli bir şekilde ayarlanması ile

ZnO-TiO_2 nanokompozitlerin fotokatalizör etkinliğinin artırılabileceğini ve bu malzemelerin çevresel kirliliklerin giderilmesi için kullanılabileceğini vurgulamaktadır.

Bu çalışmada, ZnO-TiO_2 çekirdek-kabuk nanokompozitlerin farklı Mn konsantrasyonlarının (%0, %3, %5, %7, %10) fotokatalitik aktivite üzerindeki etkisi incelenmiştir (Şekil 3).



Şekil 3. ZnO-TiO_2 çekirdek-kabuk nanokompozitlerin farklı Mn konsantrasyonlarının (%0, %3, %5, %7, %10) fotokatalitik aktivite üzerindeki etkisi

Şekil 3, 90 dakika süresince EBT'nin fotokatalitik bozunma verimliliğinde, artan Mn konsantrasyonu ile meydana gelen değişimi göstermektedir. Mn konsantrasyonu %0'dan %10'a çıkarıldığında, fotokatalitik bozunma verimliliği %70'ten %82'ye yükselmiştir. Bu artış, Mn katkısının ZnO-TiO_2 nanokompozitlerin yüzey özellikleri ve ışık absorpsiyon kapasitesi üzerindeki olumlu etkileriyle açıklanabilir.

Mn katkısının artmasıyla ZnO-TiO_2 nanokompozitlerin yüzey alanının artması, fotokatalitik aktivitenin iyileşmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Brunauer-Emmett-Teller (BET) yüzey alanı analizine göre, farklı Mn konsantrasyonlarına sahip ZnO-TiO_2 nanokompozitlerin yüzey alanı değerleri şu şekildedir: %0 Mn için 45 m^2/g, %3 Mn için 52 m^2/g, %5 Mn için 57 m^2/g, %7 Mn için 61 m^2/g ve %10 Mn için 65 m^2/g. Artan Mn konsantrasyonu ile daha küçük parçacık boyutlarının elde edilmesi, yüzeyde daha fazla aktif bölgenin oluşmasına olanak tanımaktadır. Bu aktif bölgeler, fotokatalitik reaksiyonların gerçekleştiği alanları

artırarak EBT moleküllerinin yüzeyde adsorbe olmasını kolaylaştırır. 90 dakika boyunca daha fazla molekülün yüzeyle etkileşime girmesi, reaksiyon verimliliğini artırmaktadır.

Ayrıca, artan Mn konsantrasyonu ile bant aralığında gözlemlenen daralma (Şekil 2'de görüldüğü gibi), daha geniş bir ışık spektrumunun emilmesini sağlamıştır. Daralan bant aralığı sayesinde nanokompozit, görünür ışık altında daha fazla foton absorbe edebilmiş ve bu da fotokatalitik süreçler için daha fazla enerji sağlamıştır. Bu süreçte oluşan aktif türler (hidroksil radikalleri gibi) EBT'nin daha hızlı bir şekilde bozunmasını sağlayarak, 90 dakika sonunda verimliliğin artmasına katkıda bulunmuştur.

Özellikle %10 Mn katkılı ZnO-TiO_2 numunesi, 90 dakika süresince EBT'nin bozunma yüzdesinde en yüksek artışı göstermiştir. %10 Mn katkılı numunede elde edilen %82'lik bozunma verimliliği, Mn katkısının nanokompozitin yüzey özelliklerini ve optik performansını optimize edebileceğini ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, daha yüksek Mn konsantrasyonlarının yapısal bozulmalara veya elektron-hol çiftlerinin yeniden birleşme oranının artmasına neden olabileceği göz önünde bulundurulmalıdır. Bu nedenle, optimum Mn konsantrasyonunun belirlenmesi, hem fotokatalitik etkinliği en üst düzeye çıkarmak hem de malzemenin stabilitesini korumak açısından kritik önem taşımaktadır.

Bu çalışmada elde edilen bulgular, Mn katkısının ZnO-TiO_2 nanokompozitlerin fotokatalitik performansını artırmada etkili bir strateji olduğunu göstermektedir. Şekil 3'te görülen fotokatalitik bozunma verimliliğindeki artış, bu malzemenin organik kirleticilerin bozundurulmasında etkin bir şekilde kullanılabileceğini kanıtlamaktadır. Bu durum, çevre dostu su arıtma ve organik kirleticilerin giderilmesi gibi uygulamalarda ZnO-TiO_2 tabanlı fotokatalizörlerin potansiyelini vurgulamaktadır.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, farklı Mn konsantrasyonları ile sentezlenen ZnO-TiO_2 çekirdek-kabuk nanokompozitlerin yapısal, optik ve fotokatalitik özellikleri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Sol-jel yöntemiyle hazırlanan nanokompozitlerin, %0, %3, %5, %7 ve %10 oranında Mn katkısı kullanılarak sentezlenmesi sonucunda, katkı oranının artmasıyla yapısal, optik ve fotokatalitik özelliklerde belirgin değişiklikler gözlemlenmiştir.

Yapısal analizler, Mn katkısının ZnO-TiO_2 yapısındaki çekirdeklenme ve büyüme süreçlerini etkileyerek partikül boyutunda küçülmelere neden olduğunu

göstermiştir. X-ışını kırınımı (XRD) sonuçları, Mn iyonlarının ZnO ve TiO_2 kristal yapısına başarılı bir şekilde entegre olduğunu ve bu durumun partikül boyutunda küçülme sağlayarak yüzey alanının artmasına yol açtığını ortaya koymuştur. Özellikle %10 Mn katkılı numunede gözlemlenen yaklaşık 35 nm'lik partikül boyutu, fotokatalitik aktivitenin artmasında önemli bir etken olarak öne çıkmıştır.

Optik analizler, Mn katkısının ZnO-TiO_2 nanokompozitlerinin enerji bant aralığını daralttığını ve böylece görünür ışık absorpsiyon kapasitesini artırdığını göstermiştir. UV-vis spektroskopisi ile elde edilen sonuçlar, artan Mn katkısının enerji bant aralığını yaklaşık 3.20 eV'den 3.00 eV'ye düşürdüğünü ve bu daralmanın EBT moleküllerinin daha etkin bir şekilde absorbe edilmesine katkıda bulunduğunu göstermiştir. Bant aralığındaki bu daralma, fotokatalitik reaksiyonlar sırasında daha düşük enerjili fotonların da kullanılmasına olanak tanımış ve fotokatalizörün etkinliğini artırmıştır.

Fotokatalitik aktivite testleri, ZnO-TiO_2 nanokompozitlerinin Mn katkısı ile EBT bozunması üzerindeki performansını ortaya koymuştur. %10 Mn katkılı ZnO-TiO_2 nanokompoziti, 90 dakikalık bir süre içinde EBT'nin %82 oranında bozunmasını sağlamış ve en yüksek fotokatalitik verimliliği göstermiştir. Artan Mn konsantrasyonu ile yüzey alanında meydana gelen artış ve enerji bant aralığındaki daralma, fotokatalizörün elektron-hol çiftlerinin daha verimli bir şekilde oluşmasına ve daha yüksek bozunma verimliliğine katkıda bulunmuştur.

Çalışmanın sonuçları, ZnO-TiO_2 çekirdek-kabuk nanokompozitlerin Mn katkısı ile optimize edilmesinin, bu malzemelerin fotokatalitik performansını önemli ölçüde iyileştirebileceğini göstermektedir. Mn katkısı, ZnO-TiO_2 yapısındaki yüzey özelliklerini ve optik performansı iyileştirerek, nanokompozitlerin görünür ışık altında daha etkin bir fotokatalizör olarak çalışmasını sağlamıştır. Bu bulgular, ZnO-TiO_2 tabanlı nanokompozitlerin çevre dostu su arıtma uygulamalarında kullanım potansiyelini artırmaktadır ve geniş bir kirletici yelpazesi karşısında yüksek performans gösteren fotokatalizörlerin geliştirilmesine katkıda bulunmaktadır.

Kaynakça

1. Zamora-Ledezma, C., et al. (2021). Heavy metal water pollution: A fresh look about hazards, novel and conventional remediation methods. *Environmental Technology & Innovation, 22*: p., 101504. https://doi.org/10.1016/j.eti.2021. 101504

2. Mancuso, A. and G. Iervolino. (2022). Synthesis and application of innovative and environmentally friendly photocatalysts: A Review. *Catalysts. 12*(10): p. 1074. https://doi.org/10.3390/catal12101074

3. Goktas, S. and A. Goktas, *A comparative study on recent progress in efficient ZnO based nanocomposite and heterojunction photocatalysts: A review.* Journal of Alloys and Compounds, 2021. **863**: p. 158734.

4. Prakash, J., J. Cho, and Y.K. Mishra. (2022). Photocatalytic TiO2 nanomaterials as potential antimicrobial and antiviral agents: Scope against blocking the SARS-COV-2 spread. *Micro and Nano Engineering, 14:* p. 100100. https://doi.org/10.1016/j.mne.2021.100100

5. Sudrajat, H., et al. (2020). Mn-doped TiO2 photocatalysts: Role, chemical identity, and local structure of dopant. *Journal of Physics and Chemistry of Solids, 144*: p. 109517. https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2020.109517

6. Shafique, S., et al. (2024). ZnO, TiO_2 and Ag_2O decorated MWCNTs for enhanced antibacterial and antidiabetic activities. *Inorganic Chemistry Communications, 163*: p. 112383. https://doi.org/10.1016/j.inoche.2024.112383

BÖLÜM 13

Jeolojik Açıdan Granitoyidler

Gizem Arslan[1]

[1] Arş. Gör. Dr., Fırat Üniversitesi Mühendisli Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü, ORCİD No: 0000-0002-8727-7509

1. Giriş

Granitoyidler, yerkabuğundaki magmatik derinlik kayaçları içerisinde en bol bulunan bir kayaç grubunu oluşturmaktadır. Granitoyidler, yer bilimciler tarafından kabul edildiği gibi yerküresinin yapısal ve petrolojik evriminde karakteristik kayaç grubunu oluşturmaktadır. Örneğin; uzun zamanlar boyunca, kıtasal kabuğun ortalama bileşiminin granite eşdeğer olduğu kabul edilmiştir. Günümüzde yapılan çalışmalara bakıldığında granitlerin, kıtasal kabuğun esas bileşeni olduğu ve kabuğun oluşumunda yeniden çevrimlenmesinde (recycling) önemli rol sahibi oldukları gözlenmektedir.

2. Granitoyidler

Granitoyidler %66'dan fazla SiO_2 içeren asidik kayaçlardır. %20'den fazla normatif kuvars içeren granitoyidler alkali feldispat/toplam feldispat oranına göre aşağıdaki şekilde adlandırılmaktadır:

---------- Alkali feldispat/Toplam feldispat ----------

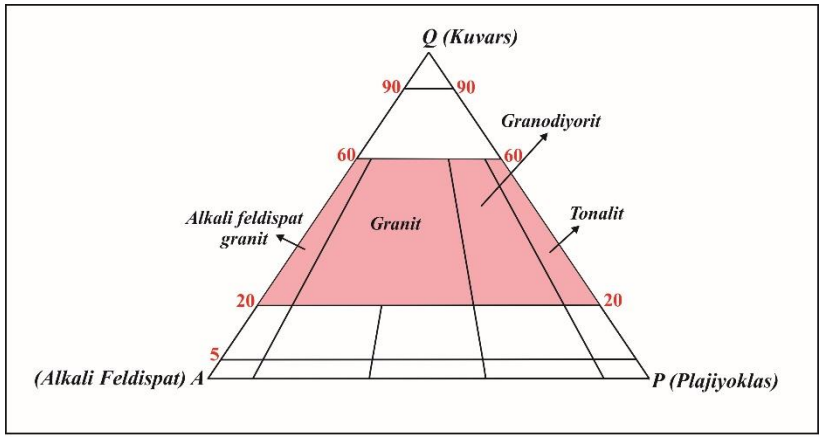
	90/100	**35/100**	**10/100**	
DERİNLİK	Alkali Granit	Granit	Granodiyorit	Tonalit
YÜZEY	Alkali Riyolit	Riyolit	Riyodasit	Dasit

Granitoyidler, yerkabuğundaki magmatik derinlik kayaçları içerisinde en bol bulunan kayaç grubunu oluşturmaktadır. Alkali granit, granit, granodiyorit ve tonalit asidik derinlik kayaçlarıdır. 1970'li yılların ortalarından itibaren bu kayaçlar **"granitoyid"** olarak tanımlanmıştır (Chappell ve White, 1974; White ve Chappell, 1977; Debon ve Le Fort, 1982). Ishihara (1981)' ya göre granitoyidler, silisçe zengin tüm granitik kayaçları ve hatta gabroyik kayaçları kapsamaktadır.

2.1. Granitoyidlerin Sınıflandırılması

Granitoyidler, son 20 yıldan beri farklı şekillerde sınıflandırılır. Bu sınıflandırmalardan önemli olanları aşağıdaki gibidir:

2.1.1. Petrografik Sınıflandırma



Şekil 2.1. QAP diyagramında granitoyidlerin yerleşimi (Streckeisen, 1976)

a) Alkali feldispat granitler: Bu granitlerde alkali feldispatlar toplam feldispatların %90' ından fazlasını oluşturmaktadır. Alkali feldispat granitler kimyasal olarak peralüminliden peralkalinliye kadar değişmektedir. Peralüminli olanlar iki mika yanında az miktarlarda andalusit, sillimanit, almandin, kordiyerit, topaz ve turmalin içerebilir. Bu granitlerin feldispatları çoğunlukla mikroklin olup aşırı derecede pertitiktir. Peralkalin granitlerde ise demir ve sodyum bakımından zengin amfibol ve piroksenler karakteristiktir.

b) Normal veya kalkalkali granitler: Bu granitlerde alkali feldispatlar ile plajiyoklaslar hemen hemen aynı orandadır. Çoğunlukla alkali feldispatlar plajiyoklasları sarar durumdadır. En fazla gözlenen alkali feldispat türü pertitik mikroklindir. Plajiyoklas olarak da en fazla oligoklas ve az oranda da andezin bulunur. Ferromagnezyen mineral olarak amfibol ve biyotit gözlenirken tali olarak da sfen, küçük prizmalar halinde apatit ve zirkon, hematit ve manyetit bulunmaktadır.

c) Granodiyoritler: Granodiyoritlerdeki plajiyoklasların toplam feldispatlara oranı 65 ile 90 arasında değişmektedir. Granitlerden plajiyoklasların oranının artmasıyla granodiyoritlere geçişte mafik mineral olan amfiboller daha baskın hale gelir. Granodiyoritlerdeki plajiyoklaslar öz ve yarı öz şekillidir. K-feldispatlar nadiren fenokristal oluşturur ve çoğunlukla pertitiktir. Ancak granodiyoritlerdeki pertitleşme granitlere oranla daha azdır.

d) Tonalitler: Tonalitlerdeki feldispatların %90'ından fazlası plajiyoklastır. Tonalitlerin mafik mineralleri biyotit ve hornblend olup mafik mineral içerikleri granit ve granodiyoritlere kıyasla fazla olabilir. Bundan dolayı da tonalitlerin renk indisleri daha büyüktür. Tonalitlerin en felsik türüne ***"tronjemit"*** adı verilir

ve tronjemitler esas olarak plajiyoklas ve kuvarstan oluşmuş olup K-feldispat ve biyotit çok az oranlarda bulunmaktadır. Ofiyolitlere bağlı olan tronjemitler ***"plajiyogranit"*** olarak adlandırılır. Plajiyogranitler albit, kuvars, biyotit ve ikincil minerallerden oluşmuşlardır.

2.1.2. Kimyasal-Mineralojik Sınıflandırma

Debon ve Le Fort (1982) tarafından Himalayalar'daki granitoyidler üzerinde yapmış oldukları çalışmalar neticesinde kimyasal-mineralojik bir sınıflandırma ortaya konulmuş ve bu sınıflamada kayaç örneklerine ait tüm kayaç ana element kimyasal analizlerinden yola çıkarak kayaç örnekleri isimlendirilerek indeks mineral diyagramında ait oldukları topluluk bulunmaktadır. Yapmış oldukları sınıflandırmaya ait üç topluluk yer almaktadır. Bunlar:

- Kafemik **(CAFEM)**
- Alümino-kafemik **(ALCAF)**
- Alümino **(ALUM)** topluklarıdır.

Debon ve Le Fort (1982)' a göre Kafemik (CAFEM), Alümino-kafemik (ALCAF) ve Alümino (ALUM) magmatik toplulukları farklı kaynak malzemesinden türemekte olup Kafemik (CAFEM) topluluk, genellikle manto kökenli, az oranda hibrid kaynaktan; Alümino-kafemik (ALCAF) topluluk, hibrid kaynaktan; Alümino (ALUM) topluluk ise genellikle kabuksal kökenli malzemeden türemişlerdir.

Kafemik topluluk (CAFEM): Bu topluluk doğada oldukça bol bulunan bir topluluk olup kayaçları daima piroksenli ve/veya hornblendli mineral parajenezleriyle başlayarak yalnızca biyotitli veya iki mikalı parajenezlerle son bulmaktadır (Debon ve Le Fort, 1982).

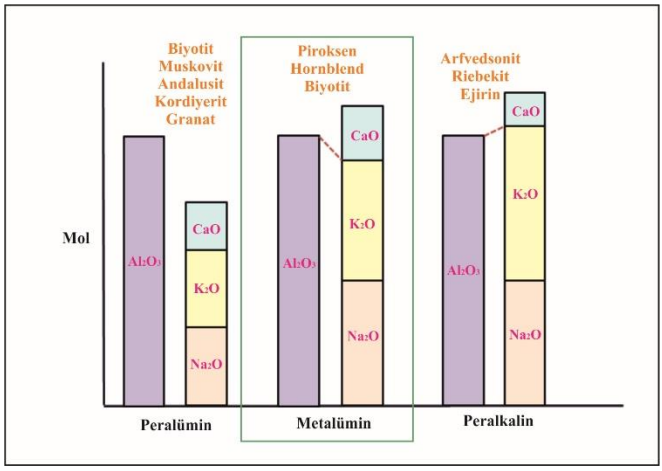
Alümino-kafemik topluluk (ALCAF): Bu topluluğa ait kayaçlar genel olarak biyotitli bazen iki mikalı parajenezlere sahip olup koyu renkli üyelerinde hornblend bulunabilir (Boztuğ, 1989).

Alümino topluluk (ALUM) : Alümino topluluktaki kayaçlar içermiş oldukları mika minarellerine ek olarak ayrıca alümino silikat mineralleri, turmalin, kordiyerit, topaz, piralspit grubu granatlar vb. mineralleri de içerirken klinopiroksen ve amfibol gibi metalümino mineralleri içermemektedirler (Boztuğ, 1989).

2.1.3. Petrojenetik Sınıflandırma

Yüksek eğimli yitim kuşaklarında iç basın yükselmesi ile su serbestleşmesi sonucunda litosferin üst manto bölümünde ergime meydana gelir ve manto kökenli magmalar oluşmaktadır. Oluşan bu magmaların ayrımlanarak yeniden kristallenmesiyle **"I tipi granitoyidler"** oluşur. Bu oluşumlar, levha sınırlarına veya hendeğe yakın yerlerde meydana gelmektedir. I tipi granitoyidlerin, ana mafik mineralleri biyotit ve hornblend'dir. Tali mineral olarak da apatit, sfen ve manyetit içermektedirler. Genel olarak granodiyorit, tonalit ve monzonitik granitle temsil edilen I tipi granitoyidlerde;

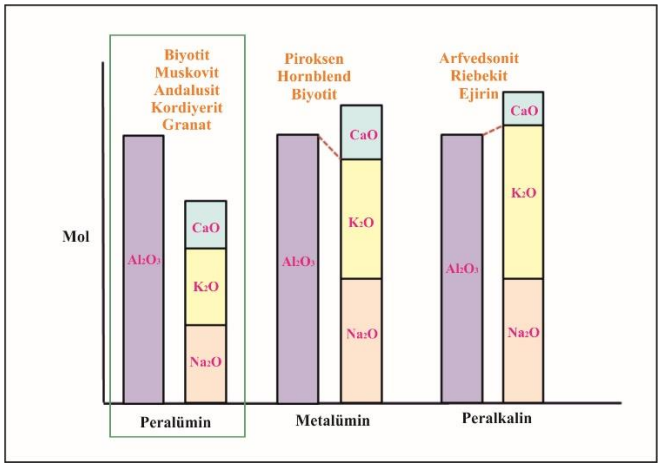
A/CNK [Molar $Al_2O_3/(CaO+Na_2O+K_2O)$] < 1.1'dir (Şekil 2.2.).



Şekil 2.2. I tipi granitoyidlerin kimyasal sınıflaması (Shand, 1927; Clarke, 1992)

Az eğimli yitim kuşaklarında su serbestleşme ve ergime litosferin üst seviyelerinde kıtasal kabuk bölümünde gelişmekte olup **"S tipi granitoyidler"** oluşmaktadır. Hendekten uzak yerlerde gözlenen bu oluşumlar iç yay bölgesi veya yay gerisi magmatikleri olarak adlandırılmaktadır. S takısı köken kayacın sedimanter (pelitik) olduğunu ifade etmektedir. Alüminyum bakımından zengin granitik kayaçları başlıca granit ve granodiyoritleri karakterize etmektedir. Ana mafik minerali biyotit olan S tipi granitoyidler hornblend içermemektedirler. Tali mineral olarak ise granat, muskovit, ilmenit, apatit ve kordiyerit bulunabilir. Kayaçların kimyasal bileşiminin alüminyum bakımından zengin olmasından ötürü andalusit ve sillimanit de gözlenebilir. S tipi granitoyidlerde;

A/CNK [Molar $Al_2O_3/(CaO+Na_2O+K_2O)$] > 1.1'dir (Şekil 2.3).

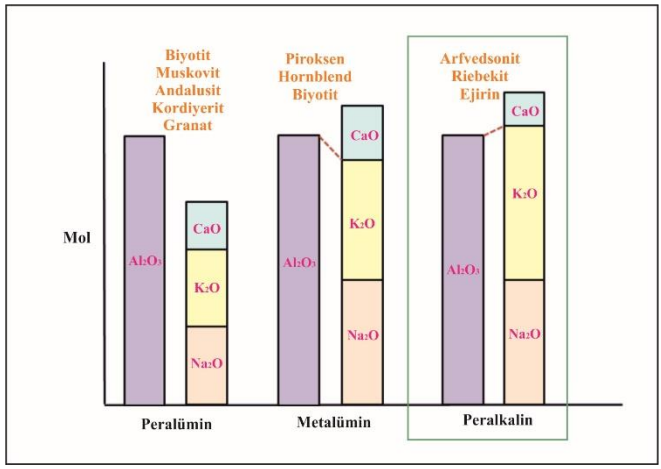


Şekil 2.3. S tipi granitoyidlerin kimyasal sınıflaması (Shand, 1927; Clarke, 1992)

Tablo 2.1. I ve S tipi granitoyidlerin karşılaştırılması (Chappell ve White,1974)

	I TİPİ GRANİTOYİDLER	S TİPİ GRANİTOYİDLER
Saha Verileri	• Genellikle geniş intrüzyonlar • Geniş bileşimsel dağılım • %15 gabro/diyorit, %50 granodiyorit, %35 granit • Volkanitlerle kökensel ve alansal ilişkili	• Genellikle küçük intrüzyonlar • Sınırlı bileşimsel dağılım • %2 gabro/diyorit, %18 granodiyorit, %80 granit • Eş yaşlı volkanizma yok
Mineralojik Veriler	• Hornblend biyotitten daha hakim • Manyetiten yaygın opak mineral • Allanit ve sfentali mineral • Kordiyerit, andalusit,sillimanit yok	• Biyotit hornblendden daha hakim • İlmenit en yaygın opak mineral • Monazit ve kasiterittali mineral olup andalusit,kordiyerit,granat bulunabilir
Kimyasal Veriler	• $Al_2O_3/(CaO+Na_2O+K_2O)] < 1.1$ • Bağıl olarak yüksek Na; felsik türlerde Na_2O normal olarak %3.2'den büyük; daha mafik türlerde %2.2'den büyük • Normatif diyopsit görülür • Normatif korund <%1 • Sr^{87}/Sr^{86} oranı<0.706	• $Al_2O_3/(CaO+Na_2O+K_2O)] >1.1$ • Bağıl olarak düşük Na; yaklaşık %5 K_2O içeren kayaçlarda Na_2O değeri normal olarak %3.2'den küçük; yaklaşık %2 K_2O içeren kayaçlarda ise %2.2'den küçük • Normatif korund <%1 • Sr^{87}/Sr^{86} oranı<0.706

Çoğunlukla alkali karaktere sahip olan **"A tipi granitoyidler"** rift zonlarında ve duraylı kıtasal bölgelerde bulunmaktadırlar. A takısı anorojenik ilişkileri ifade etmektedir. A tipi granitoyidler, I ve S tipi granitoyidlere kıyasla daha az ancak yaygın olan kayaçlar olup alkalin, susuz ve anorojenik özelliktedirler. Yüksek Fe/Mg oranına sahip olan A tipi granitoyidler yaygın pertit oluşumları içermektedirler. A tipi granitoyidlerin mineralojik bileşimleri kuvars, alkali feldispat ve az oranda plajiyoklasa ek olarak Fe bakımından zengin amfibol, mika ve piroksen mineralleri, peralkali bileşimdeki kayaçlarda ise arfvedsonit, riebekit gibi alkali amfibollerdir. A tipi granitoyidlerinin tayininde Fe' in varlığı önem arzetmektedir (URL 1). A/CNK [Molar $Al_2O_3/(CaO+Na_2O+K_2O)$] < 1.0'dır.



Şekil 2.4. A tipi granitoyidlerin kimyasal sınıflaması (Shand, 1927; Clarke, 1992)

Genel olarak plajiyogranitlerle temsil edilen **"M tipi granitoyidler"**, kimyasal bileşimleri ada yaylarındaki volkanik kayaçların kimyasal ve izotopik bileşimleri ile benzer olan granitik kayaçlar olup muhtemelen kıtasal levha kenarlarında dalan okyanus kabuğunun ergimesi sonucu oluşan mantodan türeyen çözeltilerden oluşmaktadırlar. I tipi granitoyidlerin bir alt türü olarak kabul edilen M tipi granitoyidlerin baskın mafik mineralleri biyotit, hornblend ve piroksendir. M takısı ise manto kökenine işaret etmektedir (URL 1).

2.1.4. Granitoyidlerin Ana Tektojenetik Grupları

Granitoyidlerin tektonik olarak sınıflandırılması Pearce vd., 1984 tarafından iz elementlere göre yapılmıştır (Boztuğ, 1989). Bu gruplar şu şekildedir:

- Okyanus sırtı granitoyidleri **(ORG)**
- Volkanik yay granitoyidleri **(VAG)**
- Levha içi granitoyidleri **(WPG)**

- Çarpışma ürünü granitoyidleri **(COLG)**

2.1.4.1. Okyanus sırtı granitoyidleri (ORG)

Okyanus sırtı granitoyidleri, ofiyolitik topluluklar içerisindeki "okyanusal plajiyogranit" olarak adlandırılan küçük granitoyid sokulumlarından ibarettir. Egemen mafik mineral hornblend olan okyanus sırtı granitoyidler Streckeisen (1976) diyagramına göre çoğunlukla tonalit ve kuvars diyorit bileşimindedir.

2.1.4.2. Volkanik yay granitoyidleri (VAG)

Dalma-batma zonlarında dalan okyanus kabuğundan türeyen su içeriği fazla ve daha silisli malzeme manto kökenli magmayla karışması sonucu asidik magmatik kayaçlar meydana gelmekte ve bu kayaçlar "volkanik yay granitleri (VAG)" olarak tanımlanmaktadır. Bu kayaçlar toleyitik bileşimden kalk-alkalin ve şoşonitik bileşimine değişen bileşime sahip olup okyanusaldan kıtasal konuma kadar değişen tektonik ortamlarda bulunurlar. Streckeisen (1976) diyagramına göre volkanik yay granitoyidleri granodiyorit, kuvars monzonit ve dar anlamda granit bileşimine sahiptirler.

Bu kayaçların ana mafik mineralleri hornblend ve biyotittir (URL 1).

2.1.4.3. Levha içi granitoyidleri (WPG)

Levha içi granitoyidler (WPG), içerisine sokulum yaptıkları kabuksal malzeme durumuna göre kalın kıtasal kabuk içerisine sokulum yapan granitoyidler (Oslo grabeni, Nijerya ve Sudan'daki granitler), inceltilmiş kıtasal kabuk içerisine sokulum yapan granitoyidler (Grönland ve Skotland' daki Tersiyer granitleri) ve okyanusal kabuk içerisine sokulum yapan granitoyidler (Ascension adası ve Reunion'daki granitler) olmak üzere alt gruplara ayrılmaktadır. Kuvars siyenit, alkali feldispat granit ve dar anlamda granit bileşimine sahip olan bu granitoyidlerin ana mafik mineralleri ise sodik amfibol ± sodik piroksen, biyotit + sodik amfibol parajenezine kadar değişebilmektedir (Boztuğ, 1989; URL 1).

2.1.4.4. Çarpışma ürünü granitoyidleri (COLG)

Aktif kıta kenarlarında okyanus kabuğunun dalma işlemini tamamlamasıyla kıta kabuğu dilimlerinin birbiri üzerine bindirmesiyle kıta kabuğunun kalınlaşması sonucu **"çarpışma ürünü granitoyidleri (COLG)"** meydana gelmektedir. Bu granitoyidler çarpışmayla eş yaşlı (syn-COLG) ve çarpışma sonrası (post-COLG) olmak üzere ikiye ayrılır: Çarpışmayla eş yaşlı granitoyidleri oluşturan magmanın karakteri, ergimeye uğrayan köken kayaçların kimyasal ve mineralojik özellikleriyle alakalıdır. Sedimanter kayaçların ergimesi sonucu biyotit, mus-

kovit, granat kordiyeritli peralümin karakterli S tipi granitoyidler oluşurken köken kayacı magmatik veya volkanosedimanter kayaç olan kayaçların ergimesi sonucu kalk-alkalin karakterli I tipi granitoyidler oluşmaktadır (Chappell ve White, 1974). Çarpışma sonrası granitoyidleri ise orojenik faaliyetler sonunda kıta kabuğunun dikey yönde dilimlenerek hızla yükselmesi sonucu astenosferin sokulumu ve kıta kabuğunda kısmi ergimeye uğrayan kayaçların bileşimine göre oluşmakta ve magmatizmanın karakteri de değişmektedir. Eski dalma zonunu temsil eden kayaçlardan I tipi granitoyidler oluşurken, kıta içi sedimanter kayaçlarından S tipi granitoyidler ve pasif kıta kabuğunun alt kısmındaki kayaçlardan da A tipi granitoyidler meydana gelmektedir.

4. Sonuçlar

Granitoyid terimi sadece tek bir kayaç için değil tanesel yapıya sahip petrografik ve jeokimyasal topluluk oluşturan asidik ve ortaç bileşimli granitten tonalite değişen bileşimdeki magmatik derinlik kayaçlarını kapsamaktadır.

Granitik magmalar kıtasal ve okyanusal kabuk kayaçlarının sıcaklık (T) basınç (P) ve bileşimde (X) meydana gelen değişimleri sonucu ergimesiyle oluşmaktadır.

Granitoyidler, kabuksal orojenik granitoyid grubu, karışım kökenli hibrid (kabuk+manto) orojenik granitoyid grubu ve sadece mantodan türeyen anorojenik granitoyid grubu olmak üzere üç ana petrojenetik gruba ayrılır.

5. Kaynaklar

Boztuğ, D., 1989. Granitoyidler. MTA Eğitim Serisi, 30, 138 s., Ankara

Chappell, B.W. ve White, A.J.R., 1974. Two contrasting granite types, Pacific Geology, 8, 89-98.

Clarke, R.V., 1992. Situational crime prevention: Successful case studies. New York, NY: Harrow & Heston.

Debon, F. ve Le Fort, P., 1982. Transactions of theRoyal Society of Edinbourgh (Earth Sciences),73, 135-149.

Ishihara, S., 1981. The Granitoid Series and Mineralization. Economic Geology Anniversary, 75, 458-484.

Pearce, J.A, Haris, N.B. W. ve Tindle, A.G., 1984. Trace Element Discrimination Diagrams for The Tectonic Interpretation of Granitic Rocks. Journal of Petrology, 25, 956-983.

Shand, S.J., 1927. Eruptive Rocks. New York: D. Van Nostrand Company.

Streckeisen, A.L., 1976. Classification and Nomenclature of Igneous Rocks. N. Jahrb. Miner. Abh., 107, 144-240.

URL 1: www.frmtr.com/jeoloji-jeofizik/2375365-granitik-kayaclarin-kokensel-jenetik-siniflandirilmasi.html

White, R.J.A. ve Chappell, W.B., 1977. Ultrametamorphism and Granitoid Genesis. Tectonophysics, 43, 7-22.

BÖLÜM 14

Turunçgiller ve İçerdikleri Biyoaktif Bileşenler

Şelale Öncü Glaue[1]

[1] Dr., Dokuz Eylül Üniversitesi, Efes Meslek Yüksekokulu, Gıda İşleme Bölümü, ORCID: 0000-0003-4757-6640

GİRİŞ

Tarih boyunca, yeryüzünde sebze ve meyve üreten bitkiler var olmuş ve insanlar bu bitkilerden ilaç üretmişlerdir. Bu bitkisel ilaçlar, çeşitli hastalıkların tedavisinde ve ağrıların giderilmesinde kullanılmaktadır. Dünya Sağlık Örgütü'nün (WHO) bir raporuna göre, dünya nüfusunun yaklaşık %80'i, bitkisel ilaçların yan etkilerinin az olması, kolay bulunabilirliği ve düşük maliyeti nedeniyle tedavi için hâlâ bu ilaçları tercih etmektedir. Bitkiler, kozmetik ve ilaç endüstrilerinde de kullanılan, çeşitli biyoaktivite özelliklerine sahip ikincil metabolitler gibi birçok kimyasal bileşik içermektedir. Bir araştırmaya göre, 9000'den fazla bitki terapötik ve tıbbi özellikleri nedeniyle değerlendirilmektedir (Gupta vd., 2021).

Tüm meyve ve sebze dokuları fenolik bileşikler, vitaminler ve karotenoidler gibi biyoaktif bileşikler bakımından zengindir. Meyve ve sebzeler incelendiğinde fitokimyasalların kabuk ve tohumlarda yoğunlaştığı görülmektedir (Rudra vd., 2015).

Turunçgiller (narenciye meyveleri) dünyanın dört bir yanına yayılmış olup, ferahlatıcı meyve suları ve sağlığa faydaları nedeniyle büyük ilgi görmektedir. Turunçgillerin sağlığa fayda sağlaması, içerdikleri zengin biyoaktif bileşikler, mineraller, vitaminler, flavonoidler ve karotenoidler gibi fitokimyasallardan kaynaklanır. Bu fitokimyasallar, antioksidan gibi davranarak karaciğerdeki koruyucu enzimlerin etkisini artırabilir, genetik materyalin oksidasyonunu önleyebilir ve bağışıklık sistemini güçlendirebilir (Adenaike ve Abakpa, 2021).

Antioksidan bileşikler, biyolojik aktiviteye sahip maddelerdir ve metabolik süreçleri düzenleyerek sağlığı desteklerler. Bu bileşikler, antioksidan aktivitelerinin yanı sıra enzimlerin etkisini azaltma veya artırma, reseptör aktivitelerini engelleme ve gen ifadesini artırma veya baskılama gibi faydalar da sağlar. Bu bileşikler; antialerjenik, antiaterojenik (damarları genişletici), antimikrobiyal, antiinflamatuar, antitrombotik, kardiyoprotektif (kalp koruyucu) ve kansere karşı etkiler gibi birçok yararlı özellik gösterir. Doğal antioksidan ve antimikrobiyal bileşiklere duyulan ilginin artması, bu tür biyoaktif bileşenlerin bitkilerde araştırılmasını teşvik etmiştir (Shirahigue ve Ceccato-Antonini, 2020). Bu bileşikler, insanlarda ve hayvanlarda çeşitli farmakolojik veya toksikolojik etkilere yol açan bitki metabolitleri olarak tanımlanır (Walia vd., 2019).

Turunçgiller, Rutaceae familyasının en büyük cinsidir ve dünya genelinde en çok ticareti yapılan bahçe ürünlerinden biridir (Turner ve Burri, 2013). Kabuklarında, posalarında, tohumlarında ve meyve sularında birçok biyoaktif bileşik barındırır (Klemens ve Pressmen, 2020). Ayrıca dünya çapında en çok yetiştirilen ve tüketilen meyveler arasındadır (Anticona vd., 2020). Portakal, limon, greyfurt

ve misket limonu gibi örnekleriyle turunçgiller, çok eski zamanlardan beri geniş alanlarda yetiştirilmektedir. Sadece lezzetleriyle değil, sağlığa faydaları nedeniyle de dünya genelinde tercih edilen bu meyveler, tüm kıtalarda yetiştirilen en önemli ticari ürünler arasındadır (Amutha vd., 2017). Turunçgiller, sağlık açısından faydalı besin maddeleri ve fitokimyasallar içerir. Turunçgil meyveleri ve meyve suları; karbonhidrat, lif, C vitamini, potasyum, folat, kalsiyum, tiamin, niasin, B6 vitamini, A vitamini, fosfor, magnezyum, bakır, riboflavin, pantotenik asit ve çeşitli fitokimyasallardan oluşan geniş bir içerik sunar. Bu maddeler, vücudun sağlıklı çalışması için gereklidir ve bazıları kronik hastalıklara karşı ek koruma sağlar. Ayrıca turunçgiller, bitki hücre duvarlarında bulunan ve suda çözünen bir lif olan pektin açısından da zengindir; özellikle misket limonu, limon, greyfurt ve portakal gibi turunçgil meyvelerinde bol miktarda bulunur (Al-Snafi, 2016). Turunçgiller, insan vücudu için faydalı biyoaktif bileşiklerin önemli bir kaynağıdır (Lv vd., 2015). Antik çağlardan bu yana turunçgiller, gıda olarak tüketilmenin yanı sıra bronşit, tüberküloz, öksürük, soğuk algınlığı, adet düzensizliği, yüksek tansiyon, anksiyete, depresyon ve stres gibi çeşitli rahatsızlıkların tedavisinde halk hekimliğinde de kullanılmıştır (Duarte vd., 2016). Narenciye türlerinin, yaşamı tehdit eden hastalıkları önlemeye katkısı üzerinde yapılan incelemelerde, bu meyvelerin fenolik profili ve antioksidan özellikleri sayesinde birçok umut verici biyolojik etki gösterdiği belirtilmiştir. Ayrıca turunçgillerin içerdiği bol miktarda vitamin, mineral, lif, esansiyel yağ ve karotenoidler, onları sağlık için faydalı bir meyve yapmaktadır (Pallavi vd., 2016).

TURUNÇGİLLER

Turunçgiller dünya çapında 100'den fazla ülkede yetiştirilmekte olup, başlıca üretici ülkeler Çin, Brezilya, ABD ve Akdeniz ülkeleridir. Ticari açıdan en önemli turunçgil türleri: Tatlı portakal (Citrus sinensis L. Osbeck), Greyfurt (Citrus paradisi Macf.), Limon (Citrus limon L. Burm. f.), Misket limonu (Citrus aurantifolia Christm. Swing.), Mandalina (Citrus unshiu Marc., Citrus nobilis Lour., Citrus deliciosa Ten., Citrus reticulata Blanco ve bunların melezleri) – toplam turunçgil üretiminin %80'den fazlasını oluşturur. Tablo 1'de en çok araştırması yapılan turunçgil türleri görülmektedir.

Tablo 1. En çok araştırılan turunçgil meyve türlerinin listesi.

Botanik İsmi	**Yaygın İsmi**
C. aurantifolia (Christm.) Swingle or *C.* × *lumia* Risso. & Poit.	Misket limonu, key lime, lumy, antik Akdeniz turunçgilleri
C. × *aurantium* L.	Acı/ekşi portakal
C. × *clementina*	Klementin
C. × *deliciosa* Tanore	Karadağ mandalinası
C. japonica Thunb.	Kumkuat
C. junos Siebold ex Tanaka	Junos, yuzu
C. × *latifolia* (Yu.Tanaka) Tanaka	İran Misket Limonu
C. limon (L.) Osbeck)	Limon
C. × *limonia* Osbeck	Rangpur Misket Limonu
C. maxima (J. Burman) Merr. or *C. grandis* (L.) Osbeck	Pomelo, pummelo
C. medica L.	Citron, ağaç kavunu
C. poonensis Hort. ex Tanaka	Ponkan Mandarin
C. × *paradisi* Macfad. or *C.* × *paradise* Macfad	Greyfurt, pembe/beyaz greyfurt
C. reticulata × *C. paradisi*	Tangelo
C. reticulata Blanco	Mandarin, mandalin, Phlegraean mandarin, ougan
C. reticulata × *C. sinensis*	Tangor
C. × *sinensis* (L.) Osbeck	Portakal, Valencia portakalı, kan portakalı, tatlı portakal
C. unshiu Marc.	Satsuma mandalinası, Mandalina portakalı

Kaynak: Saini vd., 2022 çalışmalarından uyarlanmıştır.

Citrus cinsi, Rutaceae ailesinin diğer üyeleri olan Fortunella, Poncirus, Microcitrus, Clymenia ve Eremocitrus ile yakından akrabadır (Palazzolo vd., 2013).

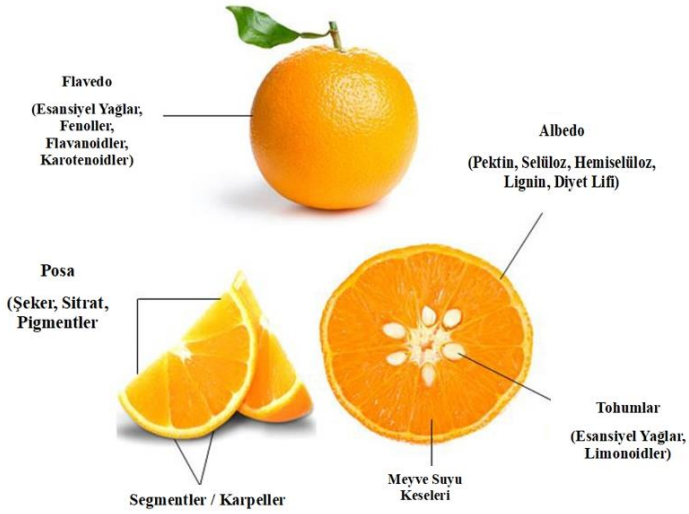
Turunçgil ailesine ait meyveler (örneğin, portakal, tatlı portakal, misket limonu, kinnow, limon, greyfurt, khatta, malta vb.), dünya genelinde en çok üreti-

len meyve gruplarından biridir ve yıllık üretimi yaklaşık 100 milyon tona ulaşmaktadır. Bu üretimin %44'ü Asya'da gerçekleşirken, %20'si Avrupa'da ve %18'i Güney Amerika'da üretilmektedir. Turunçgil üretiminin yaklaşık yarısını portakal oluştururken, üçte biri mandalina/mandarin, %8'i limon ve %7'si greyfurt üretiminden oluşmaktadır (Saini vd., 2022).

Turunçgiller; linolenik, linoleik, oleik, palmitik, stearik asitler, gliserol ve fitosterol gibi yağ bileşenlerini içerir. Ayrıca sitrik ve malik asit gibi yaygın olanların yanı sıra benzoik, tartarik, oksalik ve süksinik asit gibi diğer organik asitleri de barındırırlar. Turunçgillerde glikoz, fruktoz ve sükroz gibi şekerler, pektin esteraz, fosfataz ve peroksidaz gibi enzimler, hesperidin ve naringin gibi flavonoidler, limonin ve isolimonin gibi acı bileşikler, d-limonen gibi uçucu maddeler, selüloz ve pektin gibi çözünmeyen karbonhidratlar bulunur. Ek olarak, karotenler ve ksantofiller gibi pigmentler, B vitamini kompleksi, karotenoidler, askorbik asit (C vitamini) gibi vitaminler ile kalsiyum ve potasyum gibi minerallere de sahiptir (Bampidis ve Robinson, 2006).

Turunçgiller, besleyici özellikleri, kendine özgü tat ve kokularıyla dikkat çeker ve benzer anatomik yapılara sahiptir (Şekil 1). Şekilde de görüldüğü gibi, turunçgil meyvesi tohum, posa, dış kabuk (flavedo) ve beyaz iç tabaka (albedo) bölümlerinden oluşur. Pulpa kısmı sitratlar ve şekerler; tohumlar uçucu yağlar ve limonoidler; flavedo kısmı uçucu yağlar, flavonoidler ve karotenoidler; albedo kısmı ise pektin, selüloz, hemiselüloz ve diyet lifi açısından zengindir.

Şekil 1. Turunçgil Meyvelerinin Anatomisi



Kaynak: Suri vd., 2022çalışmalarından uyarlanmıştır.

Geçmişte turunçgiller yalnızca taze olarak tüketilirken, günümüzde konserve sektöründe reçel, jöle ve marmelat yapımında da kullanılmaktadır. Narenciye işleme endüstrisinin ana ürünü meyve suyudur. Meyve suyu, birçok gıda ve içecekte bileşen olarak kullanıldığı gibi, aynı zamanda biyoaktif uçucu yağ kaynağı olarak da değerlendirilmektedir (Zema vd., 2018; Suri vd., 2022).

Narenciye işleme endüstrisinde dünya çapında her yıl yaklaşık 15 milyon ton atık oluşmaktadır. Bu atıkların sadece küçük bir kısmı değerli ürünlere dönüştürülmektedir. Bu değerli kısımlar uçucu yağlar, diyet lifi, pektin, terpenoidler (karotenoidler, limonoidler), polifenolik flavonoidler, organik asitler ve vitaminler gibi çeşitli biyoaktif fitokimyasallar içermektedir. Narenciye atıkları, yüksek miktarda flavonoid, polifenol, karotenoid, diyet lifi, uçucu yağlar, şekerler, askorbik asit ve bazı önemli eser elementler içerir. Bu içerikleri sayesinde, biyoetanol üretimi için fermantasyona uygun yüksek miktarda şeker de barındırır (Sharma vd., 2017). Ayrıca turunçgiller, mineraller, lif, A, B ve C vitaminleri, fenolik bileşikler, karotenoidler ve limonoidler gibi fitokimyasalları içerir. Bu nedenle, yan ürünler açısından oldukça değerlidir.

Tatlı Portakallar

Portakallar, taze olarak veya meyve suyu şeklinde tüketilebildiği gibi, fonksiyonel özellikleriyle insan tüketimi için farklı ürünlerin hazırlanmasında da kullanılır. Albedo (mezokarp) gibi portakalın yan ürünlerinde bulunan antioksidanlar, reaktif serbest radikalleri etkisiz hale getirerek diğer molekülleri oksidasyona karşı koruyabilir ve böylece kanser gibi dejeneratif hastalıkları önlemeye yardımcı olabilir. Portakal (*Citrus sinensis*), dünyada en çok yetiştirilen ve ticarileştirilen meyvelerden biridir ve geniş bir tüketici kitlesine sahiptir (Da Silva vd., 2019).

Misket Limonu (Lime)

Citrus aurantifolia'nın çeşitli literatürlerde incelenen geleneksel kullanımları arasında antibakteriyel, antidiyabetik, antifungal, antihipertansif, antiinflamatuar, antilipidemi, antioksidan, antiparazitik ve antiplatelet özellikler yer alır. Ayrıca, kardiyovasküler ve karaciğer hastalıkları, osteoporoz ve böbrek taşı gibi sağlık sorunlarının tedavisinde kullanılır ve doğurganlığı artırıcı etkiler gösterir. Misket limonu (*C. aurantifolia*) suyunun kan yağlarını düşürme konusunda etkili olduğu ve bazı ilaçlarla etkileşime girme potansiyeli taşıdığı da gösterilmiştir (Narang ve Jiraungkoorskul, 2016).

Limon

Limon, dünyadaki en önemli ürünlerden biridir ve sitrik asit, askorbik asit, mineraller, flavonoidler ve uçucu yağlar gibi zengin doğal bileşikler içerir (Makni vd., 2018). Limon, farmakolojik olarak böbrek taşlarını önlemeye, boğaz ağrısını yatıştırmaya, kilo kaybını desteklemeye, kaşıntıyı hafifletmeye (anti-inflamatuar ve ağrı kesici etkiler), kansere karşı koruma sağlamaya, vücudun pH dengesini düzenlemeye ve ateşi kontrol etmeye yardımcı olur. Ayrıca romatizma, artrit, kemik hastalıkları, astım, mide bulantısı ve kemik enfeksiyonlarının tedavisinde de kullanılmaktadır (Chaturvedi vd., 2016). *Citrus limon*, fenolik bileşikler, diyet lifi ve karotenoidler gibi önemli doğal besin bileşenlerini de içermektedir. Limonun güçlü antioksidan, antimikrobiyal ve anti-enflamatuar özellikleri vardır ve yapılan araştırmalar, limon tüketiminin kardiyovasküler hastalıklar ve bazı kanser türlerinin riskini azaltabileceğini göstermektedir. Bu nedenle, limon giderek sağlığı destekleyen popüler bir meyve haline gelmektedir (Xi vd., 2017).

Greyfurt

Greyfurt (Citrus paradisi Macfadyen), büyük bir narenciye türü olup, muhtemelen pummelo ve tatlı portakalın çaprazlanmasından ortaya çıkmıştır. Greyfurt, polifenoller, C vitamini, likopen, pektin ve lif gibi sağlığa faydalı birçok besin ve fitokimyasal açısından zengindir. Yapılan araştırmalar, greyfurtun güçlü antioksidan, antimikrobiyal ve antiinflamatuar özelliklere sahip olduğunu göstermektedir. Bu yüzden greyfurt, giderek daha popüler bir sağlık destekleyici meyve olarak öne çıkmaktadır (Xi vd., 2015).

TURUNÇ MEYVELERİ: BİYOAKTİF BİLEŞİKLER

Turunçgiller, flavonoidler, alkaloidler, kumarinler, limonoidler, karotenoidler, fenolik asitler ve uçucu yağlar gibi çeşitli ikincil metabolitler içerir. Bu aktif bileşikler; antioksidan, antiinflamatuar, antikanser, kalp ve damar sağlığını koruyucu, sinir sistemi destekleyici gibi insan sağlığına faydalı birçok biyolojik aktivite gösterir (Makni vd., 2018). Çeşitli turunçgil türleri; B ve C vitaminleri, karotenoidler, flavonoidler, uçucu yağlar, kumarinler, fenilpropanoidler, limonoidler, mineraller, lif ve yüksek su içeriği ile insan sağlığı için değerli besin ve biyoaktif bileşik kaynaklarıdır (Ramírez-Pelayo vd., 2019).

Flavonoidler

Latince 'sarı' anlamına gelen 'flavus' kelimesinden türeyen flavonoidler, antialerjenik, antiviral, antiinflamatuar ve damar genişletici etkiler gibi çeşitli biyolojik aktiviteler gösteren fenolik bileşiklerdir (Kore ve Virk, 2018). Flavonoidler

genellikle meyve, sebze ve bazı faydalı antioksidan etkilere sahip içeceklerde bulunur. Son yıllarda flavonoidlerin antiviral, antialerjik, antiplatelet, antiinflamatuar, antitümör, antioksidan ve nörodejeneratif hastalıklara karşı potansiyel yararlı etkileri nedeniyle özel ilgi görmektedir. Flavonoidler kimyasal yapılarına göre flavonoller, flavonlar, flavanonlar, flavanoller, izoflavonlar ve antosiyanidinler olmak üzere altı sınıfa ayrılır (David vd., 2016).

Bitkilerde yaygın olarak bulunan polifenolik ikincil metabolitlerden olan flavonoidler, insan beslenmesinde önemli antioksidan bileşenler olarak katkı sağlar. İstatistiklere göre, şimdiye kadar 4000 flavonoid bileşiği izole edilmiş ve tanımlanmıştır. Narenciye bitkisi de yüksek miktarda flavonoid, flavon, flavonol, flavanon-7-O-glikozit, polimetoksillenmiş flavonlar (PMF) ve antosiyanin türlerini içerir. Özellikle PMF'ler, antikanser, anti-inflamatuar, antiobezite ve antiateroskleroz etkileri nedeniyle giderek daha fazla ilgi görmektedir (Saini vd., 2022).

Flavonoidler, narenciye meyvesinin kuru ağırlığının yaklaşık %10'unu oluşturur ve lipid peroksidasyonunu önleyici özellik taşır. Narenciye meyvelerinden 60'tan fazla flavonoid bileşik izole edilmiştir; bunlar arasında en bilinenleri naringin, hesperidin, neohesperidin, eriocitrin ve narirutin gibi bileşiklerdir. Narenciyenin kabukları ve tohumları, fenolik asitler ve flavonoidler de dahil olmak üzere zengin fenolik bileşik kaynaklarıdır. Ancak, fenolik içerik tohumlara göre kabuklarda daha yoğundur. Ticari olarak üretilen ilk flavonoid olan hesperidin; naringenin ve rutin ile pomelo kabuğu, greyfurt ve acı portakalın yaklaşık %80'inde bulunur ve bu meyvelere acılık kazandıran ana flavonoid bileşiktir (Shan, 2016; Mahato vd., 2019).

Flavonoidler, narenciye işleme atıklarından, meyve kabuğu ve meyve dokularının konsantre özlerinden elde edilir. Portakal flavonoidleri arasında hesperidin, greyfurt flavonoidleri arasında ise naringin öne çıkar (Shan, 2016).

Flavonoidlerin insan ve hayvan sağlığı üzerinde olumlu etkileri olduğu düşünülmekte ve hastalık tedavisi ile kanser önleme alanlarında yoğun ilgi görmektedir. İnsan vücudunda çeşitli koruyucu işlevler üstlendikleri bulunmuştur. Birçok flavonoid, nükleik asitler veya proteinlerle etkileşime girerek antimikrobiyal, böcek öldürücü ve farmakolojik etkiler sergileyen biyoaktif bileşikler olarak öne çıkmıştır. Bu nedenle flavonoidler, tıpta tedavi amaçlı ve tarımda pestisit olarak kullanılmaya uygun bileşikler olarak ilgi çekmektedir (Panche vd., 2016). Yapılan birçok deney, flavonoidlerin geniş biyokimyasal aktivitelere sahip olduğunu göstermiştir; ancak en iyi bilinen etkileri antioksidan olarak hareket etme yetenekleridir. Flavonoidlerin antioksidan aktivitesinin, sahip oldukları fonksiyonel grupların atomik düzenine bağlı olduğu bilinmektedir (Mondal ve Rahaman,

2020). Flavonoidler, serbest radikalleri doğrudan temizleyerek hücre hasarını önleyebilir ve bu sayede zararlı etkileri engelleyebilir (Mahmud vd., 2019).

Alkaloidler

Alkaloidler, genellikle karbon, hidrojen, nitrojen ve çoğunlukla oksijen içeren doğal bileşiklerdir ve özellikle bazı çiçekli bitkilerde bulunurlar (Hussain vd., 2018). Alkaloidler, güçlü farmakolojik etkileri olan ikincil bitki metabolitleridir. Bitkilerdeki en aktif bileşiklerden olup, günümüzde kullanılan bazı önemli ilaçların kaynağını oluşturur; bunlar arasında bazı antikanser ajanları da bulunmaktadır (Thawabteh vd., 2019).

Alkaloidler, etkili ve çeşitli farmakolojik özelliklere sahiptir. Modern tıpta birçok farklı potansiyele sahip olup, analjezik (örneğin morfin), antihiperglisemik (örneğin piperin), antikanser (örneğin berberin), antiaritmik (örneğin kinidin) ve antibakteriyel (örneğin siprofloksasin) etkiler gösterirler. Diğer bazı alkaloidler ise merkezi sinir sistemine uyarıcı (örneğin kokain, kafein, nikotin) ve psikotropik (örneğin psilosin) etkiler yaratır. Alkaloidlerin uzun bir geçmişi ve geniş bir kullanım alanı olmasına rağmen, sadece bazıları epilepsi, psikolojik bozukluklar, serebral iskemi, demans, hafıza sorunları, depresyon, anksiyete gibi hastalıkların tedavisinde nöro-koruyucu etki gösteren ilaçlar olarak kullanılmaktadır (Hussain vd., 2018). Ayrıca, bazı alkaloidler antibiyotik özellikleri nedeniyle antiseptik olarak da kullanılır, örneğin berberin optik tedavilerde ve sanguinarin diş macunlarında (Roy, 2017).

Limonoidler

Limonoidler, turunçgillerde bulunan, oksijen açısından zengin ve modifiye triterpenlerdir. 'Limonoid' terimi, ilk kez 1841 yılında narenciye tohumlarının acı bileşeni olarak tanımlanan limoninden türetilmiştir. Bu ikincil metabolitler, antikanser, antibakteriyel, antifungal, antimalaryal ve antiviral gibi birçok biyolojik etki gösterir (Tundis vd., 2014). Limonoidler, kolon kanseri, yumurtalık kanseri ve nöroblastomu inhibe etme ve östrojen reseptörü negatif ve pozitif insan meme kanseri hücrelerinin büyümesini engelleme potansiyeline sahiptir (Patil vd., 2017).

Turunçgillerde 73'ten fazla limonoid aglikon ve glikozit tespit edilmiştir. Aglikonlar acı bir tat verirken, glikozitler daha hoş bir tada sahiptir. Çoğu turunçgil türünde limonin ve nomilin en bol bulunan aglikonlardır. Narenciye suyunun limonin içeriği 2-3 mg/100 mL iken, posa, tohum ve kabuk içeren meyve suyu

endüstrisi atıklarında 50-350 mg/100 g KA'dır. Nomilin, turunçgillerin çeşitli kısımlarında bulunur ve olgunluğun farklı aşamalarında 50-300 mg/100 g KA arasında değişir (Lu vd., 2021).

Karotenoidler

Karotenoidler, genellikle 'karotenler' olarak bilinen, lipitte çözünebilen hidrokarbonlar grubuna aittir. Oksijenli türevleri ise 'ksantofiller' olarak adlandırılır. 'Karotenler' adı, havuçların kırmızı renginden gelir, ancak bu bileşikler yeşil yapraklar, sarı ve kırmızı meyveler ile birçok kök bitkide de yaygın olarak bulunur. Ayrıca, yumurta sarısı ve bazı balıkların rengi de karotenoidlerden kaynaklanır (Walia vd., 2019). Narenciye meyveleri de birçok karotenoid içerir. İnsan beslenmesinde en yaygın bulunan karotenoidler arasında lutein, zeaksantin, likopen, α- ve β-karoten ve β-kriptoksantin yer alır. Bu karotenoidler, antioksidan özelliklere sahiptir ve bağışıklık sistemi üzerinde olumlu etkiler yapar. Ayrıca kemik sağlığını destekler, hücreler arası iletişimi uyarır, göz sağlığını korur ve kanser riskini azaltır. Karotenoidlerin sağlığa faydalarını destekleyen pek çok veri bulunmaktadır. Ancak, karotenoidlerin insanlardaki en bilinen sağlık faydası, bazılarının A vitamini oluşturma yeteneğidir (Turner ve Burri, 2013). Karotenoidler ve β-karoten ile akciğer kanseri arasındaki ilişki ise en çok çalışılan konulardan biridir ve elde edilen veriler tutarlıdır. Hayvanlar karotenoidleri kendileri sentezleyemez, bu nedenle bu bileşiklerin kaynağı olarak diyete ihtiyaç duyarlar (Eldahshan ve Singab, 2013).

Turunçgillerde en baskın karotenoid bileşenleri yağ asidi esterleridir (ksantofil esterleri). Karotenoid içeriği bakımından örneğin, tatlı portakalın kabuk kısmı (flavedo), posasına kıyasla dokuz kat daha fazla karotenoid içerir. Narenciyelerde genellikle ksantofiller baskın olmakla birlikte, kırmızı etli pomelo ve greyfurt önemli miktarda likopen de içerir (Wang vd., 2019). Turunçgil kabuklarından elde edilen pigment, temel bileşeni doğal bir karotenoid karışımı olan ve gıda boyalarında sentetik pigmentlerin yerini alabilecek bir renklendiricidir. Karotenoidler, güçlü antioksidan etkileriyle hücreleri oksidatif hasardan koruyarak kanser gibi hastalıklara karşı koruma sağlar. Güvenli bir renklendirici olarak gıdalarda, gıda takviyelerinde, sağlıklı ürünlerde ve tatlandırıcılarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Shan, 2016).

Kumarinler

Kumarin, bitkiler aleminde yaygın olarak bulunan aromatik ve kokulu bir doğal bileşiktir. Sebzeler, baharatlar, meyveler ve tıbbi bitkiler gibi çeşitli bitki kaynaklarında bulunur ve bitkilerin tüm kısımlarında (meyveler, kökler, gövde ve

yapraklar) yer alır (Loncar vd., 2020). Turunçgillerdeki polifenolik bileşikler arasında kumarinler öne çıkar. Bitkilerde kumarinler, patojenlere karşı savunma gibi önemli allelokimyasal işlevlere sahiptir. Birçok çalışma, kumarinlerin insan sağlığı üzerindeki faydalı etkilerine odaklanmıştır. Örneğin, prenillenmiş kumarinlerin antitümör aktiviteleri rapor edilmiştir (Ramírez-Pelayo vd., 2019).

Fenolik Asitler

Fenolik asitler, turunçgillerde bolca bulunan ve askorbik asitlerden sonra ikinci sırada yer alan ikincil metabolitlerdir (Singh vd., 2014). "Fenolik asitler" terimi, bir karboksilik asit fonksiyonel grubuna sahip fenolleri tanımlar. Bu bileşikler, özellikle kardiyovasküler hastalıklar, enflamasyon ve kanser gibi oksidatif hasara bağlı dejeneratif hastalıklarla mücadele edebilme özellikleri nedeniyle incelenmektedir. Oksidatif stres, lösemi hücreleri gibi tümör hücrelerinde genellikle daha yüksek seviyelerde bulunan reaktif oksijen türleri (ROS) nedeniyle normal hücrelere göre daha belirgindir ve bu hücreler oksidatif strese karşı daha hassastır (Saxena vd., 2013). Fenolik asitler, yapılarına göre iki ana gruba ayrılır: benzoik asit türevleri ve sinnamik asit türevleri. Bunlar, bir karboksilik grup (benzoik asitler) ya da bir propenoik asit (sinnamik asitler) ile bağlı bir benzen halkasından oluşurlar (Elnour vd., 2018). Fenolik asitlerin diyabet üzerindeki etkileri de önemlidir; bu bileşikler, glikoz ve insülin reseptörlerinin işlevini etkiler. Fenolik asitlerin gösterdiği en önemli özelliklerden biri, diyetteki karbonhidratların glikoza dönüşümünü sağlayan iki anahtar enzim olan α-glukozidaz ve α-amilazın inhibe edilmesidir. Ayrıca, antimikrobiyal aktivite gösterir ve gıda koruyucu olarak da kullanılabilirler (Kumara ve Goel, 2019).

Bitkiler ve bitki preparatları, fenolik asitlerin başlıca kaynağıdır. Yüksek miktarda fenolik asit ve flavonoid içeren bitki materyalleri tüketmek, bağışıklık sistemini güçlendirir ve vücuttaki SOx radikallerinin atılmasını sağlayarak genel direnci artırır (Singh vd., 2014).

Esansiyel Yağlar

Narenciye uçucu yağları Orta Çağ'dan bu yana bakterisidal, virüsidal, fungisidal, antiparazitik, insektisidal, tıbbi ve kozmetik özellikleri nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır (Sharma vd., 2017). Günümüzde uçucu yağlar yiyecek ve içeceklerde tatlandırıcı olarak, parfüm, kişisel bakım ve tüketici ürünleri endüstrilerinde, özel kimyasal ticaretinde ve ilaç, sağlık, kozmetik ve tarım endüstrilerinde kullanılmaktadır (Palazzolo vd., 2013). Ayrıca, narenciye yağı sabun, deterjan yapımı, tekstil ve deri işlemede protein takviyesi ve sığır yemi olarak kullanılmaktadır (Mahato vd., 2019).

Esansiyel yağlar, hidrokarbonlar, oksijenli bileşikler ve uçucu olmayan kalıntılardan oluşan değerli doğal ürünlerdir. Bu yağlar, terpenler, seskiterpenler, aldehitler, alkoller, esterler ve steroller gibi bileşenler içerir (Hsouna vd.,2017). Uçucu yağlar, antimikrobiyal, antifungal, antibakteriyel ve antiparazitik özellikleri nedeniyle tıbbi tedavilerde de sıkça kullanılır (Lemes vd., 2018).

Narenciye uçucu yağları, narenciye kabuklarından elde edilen uçucu bileşiklerin birleşimiyle oluşan, aroma ve koku veren sıvılardır. Bu yağlar, günlük tüketim ürünlerinde, pestisit gibi koruyucu maddelerde ve koku bileşenlerinin üretiminde de yaygın olarak kullanılmaktadır (Suri vd., 2022).

Diyet Lifi ve Pektin

Narenciye atıkları, diyet lifleri açısından zengin kaynaklardır. Bu liflerin %50-60'ını selüloz ve hemiselüloz oluşturur, bu da narenciye kabuğunu diyet lifi elde etmek için ideal bir hammadde yapar. Diyet lifleri iki gruba ayrılır: Çözünür lifler (pektin, sakız, mukus ve bazı selüloz türleri) ve çözünmez lifler (selüloz, hemiselüloz ve lignin) (Putnik vd., 2017). Turunçgiller, pektin açısından zengin bir kaynaktır ve turunçgil atıklarında pektin oranı kuru maddenin %12-25'ini oluşturur. Bu pektik maddeler arasında pektin, pektik asit, pektinik asit ve protopektin bulunur. Suda çözünen pektik madde olan pektin, kimya endüstrisinde ticari olarak üretilir ve yıllık üretimi 60.000 tonu aşarak milyar dolarlık bir pazar yaratır (Ciriminna vd., 2016). Pektin; gıda ve ilaç endüstrilerinde emülgatör, kıvam artırıcı, stabilizatör ve yapılandırıcı olarak kullanılmakta olup dolgu maddeleri, şekerlemeler, diyet lifleri, besin takviyeleri, ilaç formülasyonları, reçel ve jöle üretiminde doğal bir jelleştirici ajan olarak da işlev görür (Putnik vd., 2017).

Pektin, turunçgil meyvelerinin sarı ve beyaz kabuğunda, meyve etinde, meyve suyu keselerinde ve orta bölgesinde bulunur. Kireç, en fazla pektin içeriğine sahipken portakal daha az pektin içerir; portakaldaki pektin oranı genellikle kuru ağırlığın %20-30'u kadardır. Gıda endüstrisinde stabilizatör ve kıvam artırıcı olarak kullanılan bu polisakkarit, diyet lifi olarak sağlık üzerinde birçok olumlu etkiye sahiptir. Pektin, besin emilimini ve mide hareketini artırır; yüksek tansiyon, kanser, diyabet, obezite gibi hastalıklara karşı önleyici ve tedavi edici etkiler gösterebilir. Tokluk hissi verdiği için kilo kontrolü sağlamak amacıyla da kullanılır. Meyve sularına ve reçellere stabilizatör olarak eklenen pektin, yağlı laktik asidi stabilize ederek daha hoş bir tat sağlar ve taşıma sırasında oluşabilecek problemlerin önüne geçer. Süt ürünlerine eklendiğinde kazein proteininin pıhtılaşmasını önleyerek raf ömrünü uzatır. Dünya genelinde kullanılan pektinin %70'i narenciye kabuğundan elde edilmektedir (Shan, 2016).

Selüloz, bitki dokularındaki hücre duvarlarının ana bileşenidir. Örneğin, narenciye kabukları ve meyve suyu kalıntıları yüksek miktarda selüloz içerir (Hiasa vd., 2014). Sağlık uzmanları, suda çözünebilen diyet liflerinin, düşük doymuş yağ ve kolesterol içeren diyetlerle birlikte kalp ve damar hastalıklarının önlenmesine yardımcı olabileceğini belirtmektedir. Turunçgil kabuklarından elde edilen selüloz, ekmek, kek, bisküvi ve diğer birçok gıdada kullanılmaktadır. Ayrıca, gıda sektöründe yapışkanlık önleyici olarak da işlev görür. Narenciye lifi, yüksek miktarda C vitamini, kalsiyum (Ca), potasyum (K) ve flavonoid içerdiği için diğer diyet lifi ürünlerine göre daha değerli kabul edilmektedir. Bu özellikleri nedeniyle, narenciye lifi daha fazla araştırılmakta ve geliştirilmekte olup, gelecekte pazarda daha fazla yer bulması beklenmektedir (Shan, 2016).

Turunçgillerdeki C Vitaminleri ve Diğer Besinler

Turunçgillerin sağlığa faydaları, büyük ölçüde yüksek C vitamini (askorbik asit) içermelerinden kaynaklanır (Singh vd., 2020). Narenciye, mükemmel bir C vitamini kaynağıdır. Çoğu kişi, orta miktarda narenciye tüketerek C vitamini için önerilen günlük miktarın (RDA) %100'üne ulaşabilir. C vitamini, antioksidan görevi görür, demir metabolizmasında, karnitin üretiminde, nörotransmitterlerde ve kemiklerde liflerin çapraz bağlanmasında rol oynar. Ayrıca, çeşitli enzimatik ve hormonal süreçlerde bir kofaktör olarak da işlev görür. C vitamini, beyaz kan hücrelerinin fonksiyonunu artırarak bağışıklık sistemini güçlendirir. Hamilelik sırasında, preeklampsi riskini azaltmaya yardımcı olabilir. Bazı araştırmalar, C vitamininin soğuk algınlığı semptomlarını hafiflettiğini ve süresini kısalttığını göstermiştir (Turner ve Burri, 2013). C vitamini, inorganik demirin vücutta daha iyi emilmesini sağlar, bu da anemi tedavisine yardımcı olabilir. Ayrıca, kolajen üretimi için gereklidir ve eksikliği, kolajenin bulunduğu dokuların (bağlar, tendonlar, dişler, cilt, damarlar ve kemikler) zayıflamasına yol açar.

Turunçgiller, C vitamini dışında şeker, diyet lifi, potasyum, folat, kalsiyum, tiamin, niasin, B6 vitamini, fosfor, magnezyum, bakır, riboflavin ve pantotenik asit gibi diğer önemli besin öğeleri bakımından da zengindir (Lv vd., 2015). Ayrıca, narenciye yağ, sodyum ve kolesterol içermez. Narenciyenin enerji değeri oldukça düşüktür, bu da obezite konusunda endişe duyanlar için önemli bir avantajdır (Turner ve Burri, 2013).

SONUÇ

Narenciye, dünyadaki en verimli meyvelerden biridir. Hem gıda olarak hem de endüstriyel alanda kullanımı yaygındır. En çok meyve suyu olarak işlenmekle birlikte, konserve ürünlerinde de önemli bir yer tutar. Kimya endüstrisi açısından ise, narenciye, uçucu yağlar ve flavonoidler gibi bileşiklerin ekstraksiyonuyla

dikkat çeker (Okunowo vd., 2013). Meyve suyu üretimi sırasında açığa çıkan uçucu yağlar, gıda ve ilaç endüstrilerinde parfüm, sabun, kozmetik, içeceklerde tatlandırıcı ve katkı maddesi üretiminde kullanılır (Zema vd., 2018). Ayrıca, bu yağlar, limonen gibi değerli bileşiklerin zengin kaynakları olarak kabul edilir.

Dünya genelinde, biyoaktif bileşiklerin farmakolojik özellikleri nedeniyle bitkisel ilaçlara olan ilgi artmaktadır. Pek çok bitkisel bileşen, geleneksel tıp yoluyla uluslararası pazarda yer bulmuştur. Turunçgiller de bu bitkiler arasında hem tıbbi hem de besleyici özellikleriyle öne çıkar. Özellikle yüksek C vitamini içeriğiyle bilinen turunçgillerin meyve suyu, kabuğu ve çiçeği gibi tüm kısımları geleneksel tedavilerde kullanılmaktadır. Kolay bulunabilirliği ve düşük atık oranı sayesinde, turunçgil kalıntıları nutrasötik potansiyele sahip değerli bir kaynak olarak değerlendirilebilir. Bu nedenle, turunçgillerin tıbbi ve nutrasötik açıdan önemli biyoaktif bileşikler sunduğu söylenebilir. Sonuç olarak, turunçgillerin antioksidanlar açısından zengin olması, vücudumuza hastalıklarla mücadele için enerji ve besin sağlaması nedeniyle günlük diyetimize dahil edilmesi önemlidir (Azman vd., 2019). Turunçgiller, hastalıkların önlenmesine katkıda bulunan biyolojik açıdan aktif birçok faydalı fitokimyasal içermektedir.

Turunçgil türleri, ekonomik değerleri ve içerdiği biyoaktif fitokimyasallar nedeniyle terapötik potansiyele sahip olarak büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle, turunçgil türlerinin potansiyelinin kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesi, farklı biyolojik aktivitelerinin belirlenmesi ve ilaç ile gıda sektörlerindeki kullanılabilirliğinin araştırılması gereklidir. Bu alandaki çalışmalar, yalnızca yeni ürün geliştirmeye odaklanmakla kalmayıp, aynı zamanda sürdürülebilir sosyoekonomik kalkınmaya katkı sağlamakta ve çevresel istikrarı korumaktadır.

KAYNAKÇA

Abakpa, G. O., & Adenaike, O. (2021). Antioxidant compounds and health benefits of citrus fruits. *European Journal of Nutrition & Food Safety, 13*(2), 65-74.

Al-Snafi, E. A. (2016). Nutritional value and pharmacological importance of citrus species grown in Iraq. *IOSR Journal of Pharmacy, 6*(8), 76-108.

Amutha, R. A., Kavusik, T. I., & Sudha, A. (2017). Analysis of bioactive compounds in citrus fruit peels. *International Journal of Scientific Research and Review, 6*(12), 18-27.

Anticona, M., Blesa, J., Frigola, A., & Esteve, M. J. (2020). High biological value compounds extraction from citrus waste with non-conventional methods. *Foods, 9*, 811.

Azman, N. F. I. N., Azlan, A., Khoo, H. E., & Razman, M. R. (2019). Antioxidant properties of fresh and frozen peels of citrus species. *Current Research in Nutrition and Food Science, 7*(2), 331-339.

Bampidis, V. A., & Robinson, P. H. (2006). Citrus by-products as ruminant feeds: A review. *Animal Feed Science and Technology, 128*(3), 175-217.

Chaturvedi, D., Shrivastava, R. R., & Suhane, N. (2016). Basketful benefit of *Citrus limon*. *International Research Journal of Pharmacy, 7*(6), 1-4.

Ciriminna, R., Fidalgo, A., Delisi, R., Ilharco, L. M., & Pagliaro, M. (2016). Pectin production and the global market. *Agro Food Industry Hi-Tech, 27*(5), 17-20.

Clemens, R., & Pressman, P. (2020). Exploring the health implications of citrus flavonoids. *Food Technology Magazine, 74*, 5.

Da Silva, A. F., Da Silva, B. M., De Sousa, A. S. B., Figueiredo, V. M. A., Mendonça, R. M. N., & Silva, S. M. (2019). Quality, bioactive compounds, and antioxidant activity during maturation of oranges produced in the Borborema Territory. *Revista Caatinga*, *32*(2), 526-536.

David, A. V. A., Arulmoli, R., & Parasuraman, R. (2016). Overviews of biological importance of quercetin: A bioactive flavonoid. *Pharmacognosy Review*, *10*(20), 84-89.

Duarte, A., Fernandes, J., Bernardes, J., & Miguel, G. (2016). Citrus as a component of the Mediterranean diet. *Journal of Spatial and Organizational Dynamics, 4*, 289-304.

Eldahshan, O. A., & Singab, A. N. B. (2013). Carotenoids. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry, 2*(1), 225-234.

Elnour, A. A. M., Mohammed, E. S. M., Musa, K. H., Kabbashi, N. A., & Alam, M. Z. (2018). Challenges of extraction techniques of natural antioxidants and their potential application opportunities as anti-cancer agents. *Health Science Journal, 12*(5), 596.

Gupta, S., Rahman, M. A., & Sundaram, S. (2021). Citrus fruit as a potential source of phytochemical, antioxidant and pharmacological ingredients. *JSHE, 2581*, 8473.

Hiasa, S., Iwamoto, S., Endo, T., & Edashige, Y. (2014). Isolation of cellulose nanofibrils from mandarin (Citrus unshiu) peel waste. *Industrial Crops and Products, 62*, 280-285.

Hsouna, A. B., Halima, N. B., Smaoui, S., & Hamdi, N. (2017). *Citrus lemon* essential oil: Chemical composition, antioxidant and antimicrobial activities with its preservative effect against *Listeria monocytogenes* inoculated in minced beef meat. *Lipids in Health and Disease, 16*, 146.

Hussain, G., Rasul, A., Anwar, H. A. N., Razzaq, A., Wei, W., Ali, M., et al. (2018). Role of plant alkaloids and their mechanism in neurodegenerative disorders. *International Journal of Biological Sciences, 14*(3), 341-357.

Kore, P. S., Virk, A., & Peste, A. (2018). Evaluation of in vitro anthelmintic potential of quercetin against *Pheretima posthuma*. *Journal of Pharmacy Research, 12*(7), 974-976.

Kumara, N., & Goel, N. (2019). Phenolic acids: Natural versatile molecules with promising therapeutic applications. *Biotechnology Reports, 24*, e00370.

Lemes, R. S., Alves, C. C. F., Estevam, E. B. B., Santiago, M. B., Martins, C. H. G., Dos Santos, T. C. L., et al. (2018). Chemical composition and antibacterial activity of essential oils from *Citrus aurantifolia* leaves and fruit peel against oral pathogenic bacteria. *Anais da Academia Brasileira de Ciências (Annals of the Brazilian Academy of Sciences), 90*(2), 1285-1292.

Loncar, M., Jakovljevic, M., Šubarić, D., Pavlic, M., Služek, V. B., Cindrić, I., et al. (2020). Coumarins in food and methods of their determination. *Foods, 9*, 645.

Lu, X., Zhao, C., Shi, H., Liao, Y., Xu, F., Du, H., ... & Zheng, J. (2023). Nutrients and bioactives in citrus fruits: Different citrus varieties, fruit parts, and growth stages. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 63*(14), 2018-2041.

Lv, X., Zhao, S., Ning, Z., Zeng, H., Shu, Y., Tao, O., et al. (2015). Citrus fruits as a treasure trove of active natural metabolites that potentially provide benefits for human health. *Chemistry Central Journal, 9*, 68.

Mahato, N., Sinha, M., Sharma, K., Koteswararao, R., & Cho, M. H. (2019). Modern extraction and purification techniques for obtaining high purity food-grade bioactive compounds and value-added co-products from citrus wastes. *Foods, 8*(11), 523.

Mahmud, A. M., Bautista, R. J. H., Sandhu, M. A., & Husseini, O. E. (2019). Beneficial effects of citrus flavonoids on cardiovascular and metabolic health. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity, 2019*(1), Article ID: 5484138.

Makni, M., Jemai, R., Kriaa, W., Chtourou, Y., & Fetoui, H. (2018). *Citrus limon* from Tunisia: Phytochemical and physicochemical properties and biological activities. *BioMed Research International, 2018*, Article ID 6251546.

Mondal, S., & Rahaman, S. T. (2020). Flavonoids: A vital resource in healthcare and medicine. *Pharmacy and Pharmacology International Journal, 8*(2), 91-102.

Narang, N., & Jiraungkoorskul, W. (2016). Anticancer activity of key lime, *Citrus aurantifolia*. *Pharmacological Reviews, 10*(20), 118-122.

Okunowo, W. O., Oyedeji, O., Afolabi, L. O., & Matanmi, E. (2013). Essential oil of grapefruit (Citrus paradisi) peels and its antimicrobial activities. *American Journal of Plant Sciences, 4*(7), 9.

Palazzolo, E., Laudicina, V. A., & Germanà, M. A. (2013). Current and potential use of citrus essential oils. *Current Organic Chemistry, 17*(24), 3042-3049.

Pallavi, M., Ramesh, C. K., Krishna, V., & Parveen, S. (2016). Peels of citrus fruits: A potential source of anti-inflammatory and anti-nociceptive agents. *Pharmacognosy Journal, 10*(6), 172-178.

Panche, A. N., Diwan, A. D., & Chandra, S. R. (2016). Flavonoids: An overview. *Journal of Nutritional Science, 5*, e47.

Patil, B. S., Jayaprakasha, G. K., & Murthy, K. N. C. (2017). Beyond vitamin C: The diverse, complex health-promoting properties of citrus fruits. *Citrus Research and Technology, 38*(1), 107-121.

Putnik, P., Bursać Kovačević, D., Režek Jambrak, A., Barba, F. J., Cravotto, G., Binello, A., Lorenzo, J. M., & Shpigelman, A. (2017). Innovative "green" and novel strategies for the extraction of bioactive added value compounds from citrus wastes: A review. *Molecules, 22*(5), 680.

Ramírez-Pelayo, C., Martínez-Quiñones, J., Gil, J., & Durango, D. (2019). Coumarins from the peel of citrus grown in Colombia: Composition, elicitation and antifungal activity. *Heliyon, 5*(6).

Roy, A. (2017). A review of the alkaloids: An important therapeutic compound from plants. *International Journal of Plant Biotechnology, 3*(2), 1-9.

Rudra, S. G., Nishad, J., Jakhar, N., & Kaur, C. (2015). Food industry waste: Mine of nutraceuticals. *International Journal of Science and Environment Technology, 4*(1), 205-229.

Saini, R. K., Ranjit, A., Sharma, K., Prasad, P., Shang, X., Gowda, K. G. M., & Keum, Y.-S. (2022). Bioactive compounds of citrus fruits: A review of composition and health benefits of carotenoids, flavonoids, limonoids, and terpenes. *Antioxidants, 11*(2), 239.

Saxena, M., Saxena, J., Nema, R., Singh, D., & Gupta, A. (2013). Phytochemistry of medicinal plants. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry, 1*(6), 168-182.

Shan, Y. (2016). *Comprehensive utilization of citrus by-products*. Academic Press, London.

Sharma, K., Mahato, N., Cho, M. H., & Lee, Y. R. (2017). Converting citrus wastes into value-added products: Economic and environmentally friendly approaches. *Nutrition, 34*, 29-46.

Shirahigue, L. D., & Ceccato-Antonini, S. R. (2020). Agro-industrial wastes as sources of bioactive compounds for food and fermentation industries. *Food Technology, 1*(6), 168-182.

Singh, A., Maurya, S., Singh, U. P., & Singh, K. P. (2014). Chromatographic analysis of phenolic acids in the fruit pulp of some citrus varieties and their therapeutic importance in human health. *International Journal of Applied Science-Research and Review, 1*(3), 150-154.

Singh, N., Jaiswal, J., Tiwari, P., & Sharma, B. (2020). Phytochemicals from *Citrus limon* juice as potential antibacterial agents. *The Open Bioactive Compounds Journal, 8*, 1-6.

Suri, S., Singh, A., & Nema, P. K. (2022). Current applications of citrus fruit processing waste: A scientific outlook. *Applied Food Research, 2*(1), 100050.

Thawabteh, A., Juma, S., Bader, M., Karaman, D., Scrano, L., Bufo, S. A., et al. (2019). The biological activity of natural alkaloids against herbivores, cancerous cells and pathogens. *Toxins, 11*, 656.

Tundis, R., Loizzo, M. R., & Menichini, F. (2014). An overview on chemical aspects and potential health benefits of limonoids and their derivatives. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 54*(2), 225-250.

Turner, T., & Burri, B. J. (2013). Potential nutritional benefits of current citrus consumption. *Agriculture, 3*, 170-187.

Walia, A., Gupta, A. K., & Sharma, V. (2019). Role of bioactive compounds in human health. *Acta Scientiae Medical Sciences, 3*(9), 25-33.

Wang, F., Lin, J., Xu, L., Peng, Q., Huang, H., Tong, L., Lu, Q., Wang, C., & Yang, L. (2019). On higher nutritional and medical properties of a carotenoid-rich mutant pomelo (Citrus maxima (L.) Osbeck). *Industrial Crops and Products, 127*, 142-147.

Xi, W., Lu, J., Qun, J., & Jiao, B. (2017). Characterization of phenolic profile and antioxidant capacity of different fruit parts from lemon (*Citrus limon* Burm.) cultivars. *Journal of Food Science and Technology, 54*(5), 1108-1118.

Xi, W., Zhang, G., Jiang, D., & Zhou, Z. (2015). Phenolic compositions and antioxidant activities of grapefruit (*Citrus paradisi* Macfadyen) varieties cultivated in China. *International Journal of Food Sciences and Nutrition, 66*(8), 858-866.

Zema, D. A., Calabrò, P. S., Folino, A., Tamburino, V., Zappia, G., & Zimbone, S. M. (2018). Valorisation of citrus processing waste: A review. *Waste Management, 80*, 252-273.



Türkiye ve Avrupa Birliği Ülkelerindeki İş Güvenliği Mevzuatının Yüksekte Çalışmalar Özelinde Karşılaştırmalı Analizi

Gökhan Değirmencioğlu[1] & Osman Aytekin[2] & Hakan Kuşan[3]

[1] Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, ORCID: 0000-0002-5820-4626
[2] Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, ORCID: 0000-0002-5916-0725
[3] Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, ORCID: 0000-0001-7689-2808

1. Giriş

Türkiye'de ve Avrupa Birliği ülkelerinde hatta dünyanın tüm ülkelerinde iş kazaları büyük bir problem olarak kendini göstermektedir. Tüm ülkelerin ortak sorunu olan iş kazaları gerekli önlemler alındığı takdirde tamamen bitmese bile önemli derecede azaltılabilir. Bazı ülkeler ekonomik şartlarının kötü olması, kapsayıcı mevzuatlarının olmaması ya da bulunan mevzuatların düzgün bir şekilde uygulanmamasından kaynaklı bu kazalardan çok fazla etkilenmektedirler. Araştırmalar sonucu ulaşılan bilgilere göre iş kazaları alt sektörlere göre ayrı ayrı incelendiğinde büyük bir kısmının inşaat sektöründe yaşanılan iş kazaları olduğu ortaya çıkmaktadır.

İnşaat sektörü, içinde bulundurduğu birçok iş grubu ve işgücüyle, ekonomide önde gelen sektörler arasında yer almaktadır. Son yıllarda ülkemizde inşaat sektöründe gözle görülür büyük projeler ve konut yapımlarının olduğu görülmektedir. Bu artış sebebiyle inşaat sektörüne ait iş kazalarında artışlar gözlenmektedir. Sektörde yaralanmalı kazaların ve ölümlerin yaklaşık %35'i yüksekte çalışan işçilerin düşmesiyle meydana gelmektedir. Ülkemizde Avrupa'ya göre özellikle iskele ekibinin iskelelerde iş güvenliği hususunda bilgilendirilmeleri için uzmanların ve uygulamada görev alan deneyimli personelin birikimlerini analiz eden araştırmalara daha çok ihtiyaç olduğu ortadadır. İskelelerin kurulumu, kullanımı ve sökümü sırasında dikkat edilmesi gereken hususlar ve iskele üzerinde alınması gereken iş güvenliği önlemleriyle ilgili yapılan çalışmalar ülkemizde hedeflediğimiz seviyelere henüz gelememiştir.

Ceylan (2014) yapmış olduğu çalışmada ülkemizdeki iş güvenliğini inşaat sektörü nezdinde değerlendirmiştir. Türkiye'deki genel iş kazaları ile inşaat iş kazaları istatistiki veriler karşılaştırma ölçütleri kullanılarak kıyaslanmıştır. Ayrıca Türk inşaat sektöründeki kazalar ile başka ülkelerdeki kazaların kıyas analizi yapılmıştır. Çalışma sonucunda inşaat iş kazalarının azalması için önerilerde bulunulmuştur. Öçal ve Çiçek (2017) yapmış oldukları çalışmada iş kazası ifadesi temel alınarak ülkemizdeki İş Sağlığı ve Güvenliği (İSG) uygulamaları analiz edilmiş olup, iş kazaları verileri Avrupa Birliği ülkeleri ile kıyaslanmıştır. Kıyaslamaya göre Türkiye'deki kazalar ile ilgili öneriler sunulmuştur. Bayraktar ve Bayraktar (2017) çalışmalarında Antalya ilindeki inşaat iş iskeleleriyle ilgili örnekler sunmuşlardır. Bu örnekler yasal düzenlemeler derlenerek inşaatlardaki güvensiz iskele uygulamalarına yöneliktir. Çalışmada sonuç olarak iskelelerdeki güvensiz uygulamalardan uzaklaşabilmek için inşaat şantiyelerinde hayata geçirilebilecek uygulama ve denetimler hakkında önerilerden bahsedilmiştir. Erdiş vd. (2011) çalışmalarında Hatay bölgesinde iskele kurulumundan sorumlu teknik

personel ile anket yapıp, iskelelerin uygun şekilde kurulumunu sağlamak için dikkat edilecek hususlar, iskelede ve sahada İSG konusunda alınan önlemler belirtilmiştir. Çalışmada iskele personeli ve ekiplerinin iskele kurulumu ve iş güvenliği konusunda daha fazla eğitim almaları gerektiği sonucuna varılmıştır. Ertekin (2014) çalışmasında iskele çeşitleri, bileşenleri, kurulum ve sökümü, kullanım alanları ve güvenli iskele kavramından genel olarak bahsedilmiş ve sonuç kısmında da güvenli iskelenin ülkemizde yaygınlaşması için öneriler sunulmuştur.

Bu çalışmada; Türkiye ve Avrupa Birliği ülkelerinde yürürlükte olan mevzuatlarda yer alan ilkeler doğrultusunda bina inşaatlarının dış cephe imalatlarında kullanılan yapı iş iskeleleri hakkındaki bilgiler incelenerek kıyas analizi yapılmıştır. Ayrıca, iş iskelelerinin sahada kurulum uygulaması ve denetimleri hakkında bilgiler verilmiştir.

2. Türkiye ve Avrupa Birliği'nde inşaat sektöründe meydana gelen iş kazası verilerinin karşılaştırılması

Çalışma şartlarının ağırlığından dolayı pek çok tehlikeyi ve riski içerisinde barındıran inşaat sektörü, gerçekleşen ölümlü iş kazaları sonucunda meydana gelen can kayıpları incelendiğinde tüm sektörler arasında ilk sıralarda yer almaktadır. Sosyal Güvenlik Kurumu 2010-2018 yılları arasına ait ve Tablo 1'de gösterilen Türkiye geneli ve inşaat sektöründeki iş kazası sayılarına göre; Türkiye genelinde gerçekleşen iş kazalarının yaklaşık %14'ünün inşaat sektöründe olduğu görülmektedir. Ancak ölümlü iş kazaları incelendiğinde; Sosyal Güvenlik Kurumu 2010-2018 yılları arasına ait ve Tablo 2'de gösterilen Türkiye geneli ve inşaat sektöründeki ölümlü iş kazası sayılarına göre, Türkiye genelinde gerçekleşen ölümlü iş kazalarının yaklaşık %35'i inşaat sektöründe gerçekleşmektedir (İSGGM, 2023). Görüldüğü üzere iş kazaları sonucunda yaşanan her üç can kaybından birisi inşaat sektöründe meydana gelmektedir.

Tablo 1. Türkiye Geneli ve İnşaat Sektöründeki İş Kazası Sayıları

Yıllar	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Türkiye Geneli	62903	69227	74871	191389	221366	241547	286068	359653	430985
İnşaat Sektörü	6437	7749	9209	26967	29699	33361	44552	62082	77157
Oran	%10,23	%11,19	%12,30	%14,09	%13,42	%13,81	%15,57	%17,26	%17,90

Tablo 2. Türkiye Geneli ve İnşaat Sektöründeki Ölümlü İş Kazası Sayıları

Yıllar	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Türkiye Geneli	1454	1710	745	1360	1626	1252	1405	1633	1541
İnşaat Sektörü	475	570	256	521	501	473	496	587	591
Oran	%32,67	%33,33	%34,36	%38,31	%30,81	%37,78	%35,30	%35,95	%38,35

İnşaat sektöründe bu denli kaza yaşanması ve bunun sonucunda genelde ağır kayıpların olması sadece gelişmekte olan ülkelerin değil gelişmiş ülkelerin de karşılaştığı büyük bir problemdir. Avrupa Birliği ülkelerinde de inşaat sektöründeki iş kazaları ve bu kazalardan dolayı yaşanan ölümler ülkemizde olduğu gibi ilk sıradadır. Eurostat resmî sitesinden (Eurostat, 2022) alınan 2010-2018 yılları arasına ait ve Tablo 3'te gösterilen Avrupa Birliği geneli ve inşaat sektöründeki iş kazası sayılarına göre; Avrupa Birliği genelinde gerçekleşen iş kazalarının yaklaşık %16'sının inşaat sektöründe olduğu görülmektedir. Ölümlü iş kazası sayıları incelendiğinde ise; Tablo 4'te gösterilen Avrupa Birliği genelinde ve inşaat sektöründeki ölümlü iş kazası sayılarına göre, Avrupa Birliği genelinde gerçekleşen ölümlü iş kazalarının yaklaşık %21'inin inşaat sektöründe olduğu görülmektedir. Avrupa Birliği genelinde her beş ölümlü iş kazasından biri inşaat sektöründe meydana gelmektedir.

Ülkeleri, işkollarını veya işyerlerini sadece kayıt altına alınan iş kazası, kaza sonucu meydana gelen ölüm ya da sürekli iş göremezlik sayıları veya kaybedilen iş günü sayısı gibi değişkenlere bakarak karşılaştırma yapmak doğru değildir. Karşılaştırmada önemli olan kaç çalışanın kazaya uğradığı değil, kazaya uğrayan çalışan sayısının araştırma yapılan çalışma grubu içerisindeki oranıdır. Buradan yola çıkarsak Türkiye'de genel iş kazaları içerisinde inşaat iş kazaları Avrupa'ya göre daha düşük oranlarda gerçekleştiği görülmektedir. Bunun sebeplerinden biri ülkemiz genelinde gerçekleşen kazaların tümünün kayıt altında alınmamasından kaynaklanmaktadır. Örneğin; 83 milyon nüfuslu Almanya'da yılda ortalama 750.000 kaza kayıt altına alınırken, 82 milyon nüfuslu ülkemizde yalnızca ortalama 430.000 kazanın kayıt altına alınması bunun en önemli göstergelerinden biridir.

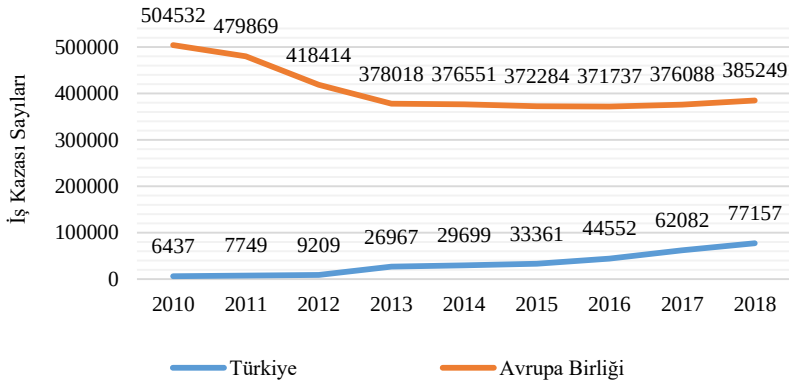
Tablo 3. Avrupa Birliği Geneli ve İnşaat Sektörü İş Kazası Sayıları (28 ülke)

Yıllar	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
AB Geneli	2842120	2724546	2485950	2460023	2407195	2411580	2442060	2483065	2504543
İnşaat Sektörü	504532	479869	418414	378018	376551	372284	371737	376088	385249
Oran	%17,75	%17,61	%16,83	%15,37	%15,64	%15,44	%15,22	%15,15	%15,38

Tablo 4. Avrupa Birliği Geneli ve İnşaat Sektörü Ölümlü İş Kazası Sayıları (28 ülke)

Yıllar	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
AB Geneli	4449	4141	3918	3679	3801	3903	3588	3552	3581
İnşaat Sektörü	1049	958	869	784	791	815	717	733	716
Oran	%23,58	%23,13	%22,18	%21,31	%20,81	%20,88	%19,98	%20,64	%19,99

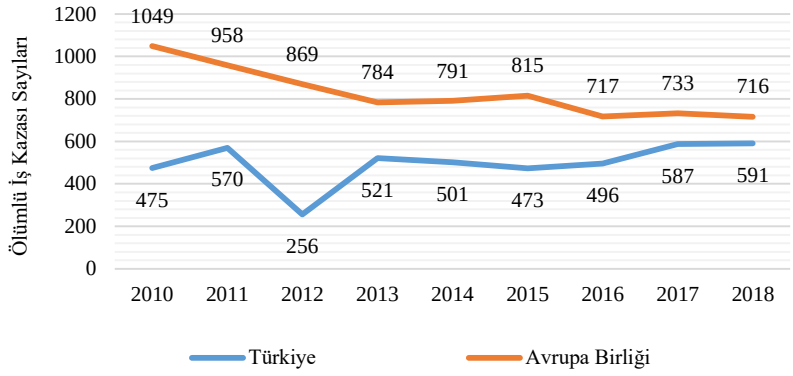
Türkiye ve Avrupa Birliği ülkeleri inşaat sektöründe meydana gelen iş kazası sayılarının karşılaştırılması Şekil 1'deki grafik ile gösterilmiştir. Bu veriler incelendiğinde Avrupa Birliği ülkelerinde 2010-2018 yılları arasında inşaat sektöründe meydana gelen iş kazası sayıları azalırken, ülkemizde ise bu oranın arttığı görülmektedir. Kaza sayılarındaki bu artışın sebebi, 6331 sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu ve ilgili yönetmeliklerin kaza bildirimleri ve denetimleri ile ilgili getirdiği yeni düzenlemelere bağlı olduğu sonucuna varılabilir.



Şekil 1.Türkiye ve Avrupa Birliği Ülkeleri İnşaat Sektörü İş Kazası Sayılarının Karşılaştırılması

Türkiye ve Avrupa Birliği ülkeleri inşaat sektöründe meydana gelen ölümlü iş kazası sayılarının karşılaştırılması ise Şekil 2'deki grafik ile gösterilmiştir. Avrupa Birliği ülkelerinde 2010-2018 yılları arasında inşaat sektöründe meydana gelen ölümlü iş kazası sayıları azalırken, ülkemizde ise bu oranın arttığı görülmektedir. Avrupa Birliği ülkelerindeki ölümlü iş kazası sayısı 28 ülkeyi kapsamakta olup, ülkeler bazında değerlendirilecek olursa bu oranın aslında çok daha

düşük olduğu söylenebilir. Ancak ülkemiz inşaat sektöründe ölümlü iş kaza sayıları yıllar içerisinde değişim gösterse bile Avrupa Birliği ile kıyaslandığı zaman hala çok yüksek bir orana sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 2.Türkiye ve Avrupa Birliği Ülkeleri İnşaat Sektörü Ölümlü İş Kazası Sayılarının Karşılaştırılması

Tablo 5'te Ülkemizde inşaat sektöründe en çok görülen kaza çeşitlerinin sınıflandırılması yapılmıştır. Bu çizelge; 4347'si Sosyal Güvenlik Kurumu arşivlerindeki iş kazası belgelerinden, 892'si mahkemelerde dava konusu olan iş kazaları için düzenlenmiş bilirkişi raporlarından elde edilen veriler derlenmiş ve toplamda 5239 iş kazası incelenerek Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı'ndan alınan verilerle yapılan bir değerlendirmedir (İSGGM, 2023).

Yüksekten düşmeler dünyadaki en önemli iş sağlığı ve güvenliği sorunlarından biridir. Şüphesiz, inşaatlarda en yüksek risklerden birisi de budur. Yüksekten düşme denince akla ilk gelen şeylerden biri yapı iş iskeleleridir. Tablo 3'e göre; can kaybına sebep olan kazalar arasında insan düşmesi ile meydana gelen kazalar (%42,9) büyük bir farkla ilk sırada bulunmaktadır (İSGGM, 2023).

Tablo 5. Türkiye'de İnşaat Sektöründe Meydana Gelen Kazaların Ana Gruplarda İncelenmesi

Ana Gruplar	Ölüm		Yaralanma		Toplam	
Kaza Tipi	**Sayı**	**Oran (%)**	**Sayı**	**Oran (%)**	**Sayı**	**Oran (%)**
İnsan Düşmesi	1028	42,87	934	32,88	1962	37,45
Elektrik Çarpması	293	12,22	80	2,82	373	7,12
Malzeme Düşmesi	251	10,47	278	9,79	529	10,10
Yapı Makinesi Kazaları	206	8,59	97	3,41	303	5,78
Şantiye İçi Trafik Kazası	168	7,01	38	1,34	206	3,93
Yapı Kısmının Çökmesi	167	6,96	73	2,57	240	4,58
Kazı Kenarının Göçmesi	138	5,75	53	1,87	191	3,65
Patlayıcı Madde Kazası	50	2,09	82	2,89	132	2,52
Malzeme Sıçraması	10	0,42	211	7,43	221	4,22
Uzuv Kaptırması	1	0,04	604	21,26	605	11,55
Uzuv Sıkışması	1	0,04	200	7,04	201	3,84
El Aleti İle Ele Vurma	0	0,00	42	1,48	42	0,80
Sivri Uçlu Keskin Cisim	0	0,00	75	2,64	75	1,43
Diğer	85	3,54	74	2,60	159	3,03
Toplam	2398	100,00	2841	100,00	5239	100,00

Tablo 6 incelendiğinde ise can kaybına sebebiyet veren en önemli kaza tipi olan insan düşmesine ait alt grupların döşeme ve platform kenarlarında düşme ve yapı iş iskelelerinden düşme kaynaklı kazaların olduğunu ve çoğunluğunun ölümle sonuçlandığını görmekteyiz. Avrupa ve Türkiye'deki bu istatistik veriler özellikle inşaat sektöründe yüksekte çalışma alanlarının ne kadar önemli olduğunu ve bu alanlarda yapılan çalışmalar için mevzuat içerisinde bazı temel ve gerekli tedbir çözümlerin uygulanması gerektiği sonucuna işaret etmektedir.

Tablo 6. Düşmelerden Kaynaklı Kazaların Kaza Tipleri

İnsan Düşmesi-Alt Gruplar	Ölüm		Yaralanma		Toplam	
Kaza tipi	**Sayı**	**Oran (%)**	**Sayı**	**Oran (%)**	**Sayı**	**Oran (%)**
1. Döşeme-Platform Kenarından	248	35,73	190	24,14	438	29,57
2. İş İskelelerinden	139	20,03	236	29,99	375	25,32
3. Yapıdaki Boşluklardan	99	14,27	71	9,02	170	11,48
4. Çatılardan	76	10,95	71	9,02	147	9,93
5. Hemzemin Düşmeler	11	1,59	61	7,75	72	4,86
6. El Merdivenlerinden	21	3,03	40	5,08	61	4,12
7. Elektrik Direklerinden	19	2,74	38	4,83	57	3,85
8. Sabit İnşaat Merdivenlerinden	14	2,02	22	2,80	36	2,43
9. Yük Asansörlerinden	11	1,59	4	0,51	15	1,01
10. Zemindeki Boşluklara, Çukurlara	9	1,30	6	0,76	15	1,01
11. Diğer Tip Düşmeler	47	6,77	48	6,10	95	6,41
Toplam	694	100,00	787	100,00	1481	100,00

3. Türkiye'deki iş güvenliği mevzuatının yüksekte çalışmalar özelinde incelenmesi

Türkiye'deki iş güvenliği mevzuatının yüksekte çalışmalar özelinde incelendiğinde 6331 Sayılı İş Sağılığı ve Güvenliği Kanunu'na bağlı olarak çeşitli yönetmelikler, tebliğler ve standartlarla özelleştirildiğini ve kapsamının son yıllarda geliştirildiğini görebiliriz.

3.1. Yapı İşlerinde İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetmeliği

Yapı İşlerinde İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetmeliği'nin (Remi Gazete, 2013) 92/57/EEC Avrupa Konsey Direktifi (EEC, 1992) göz önünde bulundurularak hazırlanan bir yönetmelik olduğu söylenebilir. Yönetmelik yüksekte çalışmalarla ilgili olarak bazı temel hususlardan bahsetmektedir. Örnek olarak yapılacak işlemler yüksekte yapılması zorunlu bir uygulama değilse mümkün mertebe yerde yapılmasını önermektedir. Ayrıca bariyer, korkuluk gibi toplu koruma tedbirlerinin tek başına faydalı olmayacağı ve vücut kemer sistemleri veya benzeri güvenlik sistemlerinin de muhakkak uygulanması gerektiği belirtilmektedir. Bir diğer husus yüksekte çalışma yapılan donanımın, örneğin iskelenin, sadece kurulum veya söküm şartlarını yerine getirmenin yeterli olmayacağı, kullanılan donanımın

kontrolleri ve bakımının da yapılması gerektiğini vurgulamaktadır. En önemli uygulamaya yönelik konulardan biri de yüksekte çalışacak işçilerin bilinçli olması, bunun için yüksekte çalışmayla ilgili tehlike ve riskler konusunda bilgilendirme yapılmış olmasının zorunluluğudur. Ayrıca, yüksekteki çalışmaların denetiminin işverenin belirlediği bir uzman tarafından (İSG uzmanı) yapılması gerektiği zorunlu kılınmaktadır. Yüksekte yapılacak çalışmaların yapıldığı platformlar ve geçitlerin işçileri düşmekten ve düşen nesnelerden koruyacak biçimde yapılması, boyutlandırılması ve kullanılmasının zorunluluğundan bahsedilmektedir. Bu kısım Avrupa direktifinde yoktur.

Yönetmeliğin EK-5A bölümünde dış cephe iş iskeleleri için minimum şartlardan bahsedilmiştir. Özellikle iskelenin TS EN 12810-1 standardına (Resmi Gazete, 2005) uygunluk belgesine sahip olması gerektiği vurgulanmaktadır. Yönetmeliğin EK-5C kısmında sütunlu çalışma platformlarının nasıl ve ne şekilde kullanılması gerektiği konularında zorunlu yapılması ve alınması gerekli tedbirlerden bahsedilmektedir. Yönetmeliği EK-5Ç kısmında düşeyde ve yatayda kullanılan yaşam hatlarının kullanılmasının zorunluluğundan bahsedilmiştir. Yaşam hatlarının kazaların önlenebilmesi için büyük önem teşkil ettiği, toplu koruma önlemlerinin alınmasının uygun olmadığı yerlerde doğru ankraj sistemleri ve kişisel koruyucu donanımlarla birlikte kullanılması gerektiği vurgulanmaktadır. Yönetmeliğin son kısmında EK-5D bölümünde güvenlik ağlarına değinilmiştir. Bu uygulamanın tedbirlere ek tedbir olarak ya da düşmenin önlenmesinin diğer tedbirlerle mümkün olmadığı çalışma alanlarında düşmeyi durdurucu toplu koruma tedbiri olarak kullanılmasının zorunluluk arz ettiği vurgulanmıştır.

3.2. İş Ekipmanlarının Kullanımında Sağlık ve Güvenlik Şartları Yönetmeliği

Yüksekte yapılan geçici işlerde, iş ekipmanının kullanımı ile ilgili genel hususlara yer verilen yönetmelikte (Resmi Gazete, 2013) yüksekte yapılan geçici işler için uygun bir yer bulunması, güvenlik içinde ve elverişli şartlarda yapılamayan alanlarda güvenliği sağlayacak ve devam ettirecek en uygun iş ekipmanın seçilmesi gerektiği vurgulanmaktadır. Yüksekte geçici çalışma yerlerine ulaşım için en uygun araçlar seçilmesi, bu seçim yapılırken aracın kullanım sıklığı, bulunduğu yükseklik gibi dikkat edilmesi gereken hususlara yer verildiği görülmektedir.

3.3. Kişisel Koruyucu Donanım Yönetmeliği

Kişisel Koruyucu Donanım Yönetmeliği'nin (Resmi Gazete, 2013) amacında; piyasada bulunan kişisel koruyucu donanımların tasarım ve üretimindeki gerekleri ve bu donanımları kullanan çalışanların sağlık ve güvenliğini sağlanmasının

gerekliliğinden bahsedilmektedir. Yönetmelikte özellikle düşmelerden korunmak amacıyla yaşam hatlarının kullanılması gerektiği, hangi ekipman ve bağlama sistemlerinin kullanımının gerekli olduğu açıklanmıştır. Kayma sonucu meydana gelebilecek düşmeleri önlemek amacıyla iş ayakkabısının kullanımın zorunlu olduğu ifade edilmektedir. Düşmeleri önlemek için bir diğer önemli tedbir ankraj noktasına bağlanan vücut emniyet kemeridir. Yönetmeliğin bu hususlar için içerdiği bilgilerin önemli bir kısmının 92/57 EEC Avrupa Birliği direktifinden aynen alınıp yönetmelikte yer aldığı görülmektedir.

3.4. Ahşap ve Ön Yapımlı Çelik ile Alüminyum Alaşımlı Bileşenlerden Oluşan Dış Cephe İş İskelelerine Dair Tebliğ

Bu Tebliğ, yapılan işin niteliği ya da çalışma alanının çevresel özelliklerinden kaynaklı imalatların dış cephede yapılmasının gerekli ve çalışanların yüksekten düşme riskinin bulunduğu yapı inşaatlarının dış cephelerinde gerçekleştirilen; duvar, sıva, ısı-ses-su yalıtımı, kaplama, boya, montaj işleri, restorasyon, yıkım-söküm ve benzeri yapım işleri ile onarım ve güçlendirme işleri için kullanılan ahşap ile ön yapımlı çelik ve alüminyum alaşımlı bileşenlerden oluşan dış cephe iş iskelelerinin detay çizimlerinin yapılması ile ruhsat eki statik projeler dâhilinde idareye sunulmasına ilişkin usul ve esasları düzenlemek üzere oluşturulduğu görülmektedir.

3.5. Ön Yapımlı Bileşenlerden Oluşan Cephe İskeleleri ile İlgili Standartlar

TS EN 12810-1 ve TS EN 12810-2 standartlarının (Resmi Gazete, 2005) tamamen Avrupa Birliği standartlarından birebir alıntı yapılarak hazırlandığı görülmektedir. Bu standartlardan ilki; hafif çelik, çelik ve alüminyum malzemeden üretilecek olan iskele sistemlerini oluşturan tüm elemanların hangi malzemeden yapıldığı ve hangi özelliklerde üretilmesi gerektiği ile ilgili bir yönetmelik olduğu anlaşılmaktadır.

İkinci standartta ise; ön yapımlı bileşenlerden oluşan cephe iskele sistemlerinin hesap ve deney yolu ile yapısal analizleri ve tasarımı için kurallar tanımlanmaktadır. Yapı İşleri İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetmeliği'nde seçilen iskelenin kurulum ve kullanım şekline göre sağlamlık ve dayanıklılık hesaplamalarının olması gerektiği, bu hesaplamaların ve kullanılacak iskele elemanlarının bu standartlara uygunluğunun zorunlu olduğu görülmektedir (Yazıcı, 2014).

3.6. Geçici İş Donanımları İle İlgili Standartlar

Bu standartlardan ilki olan TS EN 12811-1 standardı (TSEK, 2005), iş iskelesi olarak nitelendirilen iş ve erişim iskelelerine ait performans gerekleriyle genel ve

yapısal tasarım yöntemlerini içermektedir. İkincisi olan TS EN 12811-2 standardı (TSEK, 2005), yapı inşaatı işlerinde sıklıkla kullanılan malzemelerin kılavuz bilgileri ve tasarımcının dikkate alması gereken hususlar bulunmaktadır. Bu bilgiler sıklıkla kullanılan çelik ve alüminyum malzemeleri içermektedir. Üçüncüsü olan TS EN 12811-3 standardı (TSEK, 2005) ise, mekanik olmayan iş ekipmanlarıyla ilgili yükleme deneyleri, belgelendirme ve yapılan deney sonuçlarının değerlendirilmesi için özel şartları içermektedir.

3.7. Ahşap Bileşenlerden Oluşan Dış Cephe İş İskeleleri

Avrupa Birliği Standartlarında olmayan ve sadece Türkiye'ye özgü TS 13662 standardı (TSEK, 2015), ahşap dış cephe iş iskelesinin tahkikine ve tasarımına temel teşkil edecek şekilde kullanılmak üzere tasarlanması gerektiğini vurgulamaktadır. Türkiye'de geçerli mevzuata göre ahşap dış cephe iş iskelesi yüksekliği en fazla 13,5 m olduğundan dolayı bu standartta verilen kurallar 13,5 m yüksekliğe kadar inşa edilecek ahşap dış cephe iş iskeleleri için geçerli olduğu anlaşılmaktadır.

4. AB ülkelerindeki iş güvenliği mevzuatının yüksekte çalışmalar özelinde incelenmesi

AB ülkelerindeki iş güvenliği mevzuatının yüksekte çalışmalar özelinde incelendiğinde AB Konsey Direktifleri ve bu direktiflere bağlı olarak ülke bazlı çeşitli yönetmelikler ve standartlarla özelleştirildiği görülmektedir.

4.1. Avrupa Ürün Güvenliği Yönetmelikleri

Avrupa Birliği, bir dizi yüksek riskli endüstriyel ürünün tüketicileri için sağlık ve güvenlik seviyesini uygun standartlara getirmek amacıyla bazı direktifler yayınlamıştır. Bu direktifler Avrupa Birliği'nde üretim yapıp pazarlayan üreticilerin ürünlerinde sağlamasıyla yükümlü olduğu sağlık ve güvenlik şartlarını belirlemektedir. Bu zorunlu temel gereksinimler Avrupa Standartları (EN) kapsamında incelenmiştir.

4.2. İş İskelesi İle İlgili Çalışma Koşullarına İlişkin Avrupa İş Sağlığı Ve Güvenliği Yönetmelikleri

AB Konsey Direktiflerine göre, yapı iş iskelesi, çok yüksek riskli bir ürün olarak kabul edilirken, üreticilerin özel uyumunu gerektiren bir ürün güvenlik direktifine sahip değildir. Yapı iş iskeleleri için özel bir direktif olmasa da diğer iş ekipmanlarıyla beraber, çalışanların iş yerindeki sağlık ve güvenlik standartlarını geliştirmek için alınacak önlemlerle ilgili 89/391/EEC Konsey Direktifi (EEC, 1989) hükümlerine tabidir. Daha sonra Avrupa Birliği Konseyi 89/391/EEC direktifinde değişikliğe giderek 2001/45/EC (EEC, 2001) direktifini yayınlamıştır.

Bu direktif esasen her tür iş ekipmanının doğru kullanım şeklini düzenlemektedir, ancak ekipmanın temel fiziksel gereksinimlerini içermemektedir.

Avrupa'da dış cephe iş iskelelerinin kullanılmasına yönelik özel düzenlemeler olduğu görülmektedir. Asgari güvenlik ve sağlık gerekliliklerine ilişkin 2009/104/EC sayılı Avrupa Konseyi Direktifinde (EEC, 2009) "İskele kullanımına ilişkin özel hükümler" başlığı altında düzenlemelerin mevcut olduğu ve bu bölümün Türkiye'de de birebir aynı şekilde kullanıldığı görülmektedir.

İşçilerin çalışma prosedürleri ve eğitimiyle ilgili uygulama yönetmeliği hâlihazırda Avrupa mevzuatında yer almaktadır. Bunun yanında özellikle 2009/104/EC sayılı Direktifin, ürün güvenliği yönetmeliğinin değil, İş Sağlığı ve Güvenliği yönetmeliğinin bir parçası olduğu görülmektedir.

4.3. 92/57/EEC Konsey Direktifi

Geçici veya mobil inşaat sahalarında asgari sağlık ve güvenlik koşullarının sağlanması hakkındaki bu direktifte (EEC, 1992) bu çalışmanın konusuyla alakalı ve Türkiye'deki mevzuatla kıyasının yapılacağı kısımlar, direktifteki BÖLÜM–II'de var olan Açık Mekânlardaki Çalışma Yerleri kapsamında "Düşen cisimler", "Yüksekten düşme" ve "Yapı iş iskelesi ve merdivenler" başlığı altındaki kısımlardır.

Bu direktif incelendiğinde; düşen cisimler kısmında Türkiye'deki yönetmelikle benzer olarak, malzemelerin düşmesine karşı alınacak tedbirlerden, toplu korumalardan ve gerekli yerlerde kapalı geçitler kullanmaktan bahsedilmektedir. Yüksekten düşme başlıklı bölümde ise düşmelere karşı yeteri kadar yüksek olan korkuluklar (minimum 1 metre) kullanımının öneminden bahsedilmektedir. Bu kısımdaki bir diğer önemli husus ise; yüksekte çalışmaların güvenlik ağı gibi toplu koruma ekipmanlarıyla yapılmasının gerekli olduğudur. Ayrıca toplu korumalar dışında uygun erişim yollarının sağlanması, emniyet kemerlerinin veya diğer sabitleme güvenlik yöntemlerinin kullanılmasının zorunlu olduğu görülmektedir.

Direktifte Türkiye'deki yönetmelikten farklı olarak merdivenler yeterince sağlam olmalı, doğru şekilde korunmalı ve kullanım amacına uygun olarak kullanılmasından bahsedilmiştir. Ayrıca direktifin son bölümünde "mobil iskelelerin ani hareketlere karşı emniyete alınmalıdır" hükmü yer almaktadır.

4.4. 2009/104/EC Avrupa Birliği Direktifi

İş ekipmanlarının seçimi, nitelikleri ve kullanımı ile ilgili olan bu direktifte, yüksekte yapılan geçici işler için güvenliği sağlayacak en uygun iş ekipmanı ve

araçların seçiminden bahsedilmektedir. Bu seçim yapılırken aracın kullanım sıklığı, bulunduğu yükseklik gibi hususlara dikkat edilmesi gerektiği, kişisel koruma yöntemlerinden ziyade toplu koruma yöntemlerine öncelik verilmesi gerektiği vurgulanmaktadır. Direktifte ayrıca iskelelerin sağlamlık, dayanıklılık hesabı ve kurma, kullanma, sökme planı yapılması gerektiği üzerinde durulmuştur. İskelenin olası kayma ya da göçmesine karşı gerekli olan ekipmanlar kullanılmasının zorunluluğundan bahsedilmektedir.

4.5. 2016/425 Sayılı Avrupa Parlamentosu ve Konsey Yönetmeliği

Avrupa Birliği ülkelerinde geçerli olmak üzere kişisel koruyucu donanımların üretiminden kullanımına kadar çalışanların güvenliğini sağlamak amacıyla bu yönetmeliğin oluşturulduğu görülmektedir. Ayrıca bu yönetmelik (EEC, 2016); Türkiye'de 2019 yılında güncellenerek yayınlanan Kişisel Koruyucu Donanım Yönetmeliğine de zemin oluşturmuştur. Yüksekte çalışmalarda güvenliğin sağlanması için kişisel koruyucu donanımların kullanılması son derece çok önemlidir. Türkiye'deki bu yönetmelikte özellikle düşmeler sonucu meydana gelen kazalar ve ölümler için kayma önleyici iş ayakkabısı ve vücut emniyet kemerlerinin önemine değinilmiştir.

4.6. AB Ülkelerinde Kullanılan Standartlar

Avrupa Birliği'nde inşaat işlerinde kullanılan dış cephe iş iskelelerinin iş sağlığı ve güvenliği açısından özelliklerinin tanımlandığı, kurulum, kullanım ve sökülme işlemlerinin detaylarının verildiği standartlar; EN 12810-1, EN 12810-2, EN 12811-1, EN 12811-2, EN 12811-3 ve EN 12811-4 standartlarıdır. Bu standartlar 2003 yılında yürürlüğe girmiş, Avrupa Standartlar Komitesi (European Committee for Standardization - CEN) ülkeleri bu standartlarda herhangi bir değişiklik yapmadan kullanmışlardır. Türkiye'de de CEN ülkelerinde olduğu gibi 2005 yılından bu yana bu standartlar kullanılmaktadır.

5. Türkiye ve AB ülkeleri iş güvenliği mevzuatının karşılaştırılması

Avrupa Birliği ülkelerinin bazılarında mevcut AB Direktifleri ve yönetmelikleri aynı alınmasına karşın bazı ülkelerde değişiklikler ve ilaveler yapıldığı görülmektedir. Bu yapılan değişiklikler ve ilaveler Milli A sapmaları olarak tanımlandığı görülmektedir. Bu Milli A sapması ya da A-Sapması olarak nitelenen hususlardaki açıklamalar incelendiğinde; A-Sapmasının ilgili ülkenin CEN üyeliği dışında geçen süreçte, mevzuatlarında yapılan değişikliklerden meydana gelen sapmalar olarak tanımlandığı görülmektedir. Bu A-Sapması eklenen yönetmeliklerin sadece ilgili ülkeyi bağladığı, A-Sapması eklenmeyen ülkelerde ise EN standartlarının aynen geçerli olacağı ifade edilmektedir.

5.1. EN 12180-1 Standardındaki Bazı Farklar

Bazı Avrupa ülkeleri iskele sınıflandırmasında sınıf seçeneklerini azaltmışlardır. Avrupa ülkeleri özellikle; teknik onay işlemleri, kalite kontrol kuralları ve farklı görevler için kurumların onayı gibi alanlarda değişik uygulamalar getirmişlerdir. CEN üyesi ülkelerin iş güvenliği mevzuatlarına bakıldığında bu standart için sadece Almanya'da farklılıklar olduğu görülmektedir. Özellikle iskelede mevcut platform ünitelerinin istem dışı kalkmasına karşı güvenlik mekanizması EN 292'ye uygun olması gerektiği vurgulanmaktadır. EN 292 standardında direkt olarak platform ünitelerinin istem dışı kalkmasına önlem olarak bir madde bulunmamakta ancak makinelerin montajı sırasında bazı tedbirlerden bahsedilmektedir. Dış cephe iş iskelelerinde, bu Avrupa Standardıyla birlikte yayınlanan DIN 4420-1'e uygun olarak servis iskelelerinin koruma işlevini yerine getirilmesinin zorunlu olduğu görülmektedir.

5.2. EN 12811-1 Standardındaki Bazı Farklar

Avusturya'da, Avusturya Federal Resmî Gazetesi, 340/1994 sayılı yönetmelik (RFMLE, 1994) uyarınca dikey merdivenlerin yapı iskelelerinde kullanmak için kabul edilebileceği, yan koruma bariyer yüksekliğinin en az 1 metre olması gerektiği vurgulanmıştır. İtalyan ulusal yasama sapmalarına bakıldığında ise; İtalya'da Cumhurbaşkanı Kararnamesi'ne göre 7 Ocak 1956 tarihli "İnşaat sektöründe işyerinde kazaların önlenmesi için standartlar" isimli yönetmeliğinde, topuk tahtası yüksekliği 15 cm yerine 20 cm olması zorunluluğunun getirildiği görülmektedir.

5.3. Karşılaştırma Bulguları

Türkiye, Avrupa Birliği uyum süreci kapsamında Avrupa Standartlarını ve yönetmeliklerini örnek almıştır. CEN ülkelerinden biri olan ülkemiz Avrupa Standartlarını birebir aynı şekilde uygulamaktadır. Standartlarda bazı ülkeler Milli A Sapmalarına sahiptir. Milli A Sapmaları ülkelerin CEN üyeliği dışında olan zamanki ulusal mevzuatlarındaki değişikliklerdir. Örneğin, EN 12810-1 kapsamında Türkiye ve Avrupa ülkeleri birebir aynı standardı kullanırken Almanya'da platform ünitelerinin istem dışı kalkmasına karşı güvenlik mekanizması EN 292'ye uygun olması zorunluluğunu aramaktadır. Almanya'da ayrıca cephe iskeleleri Avrupa Standartlarına ek olarak DIN 4420-1'e uygunluk aranmaktadır. EN 12811-1 standardı için İtalya'da topuk tahtası yüksekliği 15 cm yerine 20 cm olması istenmektedir. İtalya dışındaki ülkelerde, buna ülkemiz de dâhil, 15 cm olarak kullanılmaktadır.

AB direktifleri ülkeler için yol gösterici, temel oluşturucu direktiflerdir. Ülkeler bu direktifleri temel alarak ulusal yönetmeliklerini oluşturmaktadır. Türkiye de AB direktiflerini temel alarak ulusal yönetmeliklerini oluşturan ülkeler arasındadır. Avrupa Birliği ve Türkiye'de iskelelerle ilgili yönetmelikler doğal olarak benzerlik göstermektedir. Türkiye'deki "İş Ekipmanlarının Kullanımında Sağlık ve Güvenlik Şartları Yönetmeliği" dayanak olarak Avrupa Birliği Direktifi olan 2009/104/EC sayılı direktifi almıştır. Bu direktifte iskeleler ile ilgili kısımlardaki gerekler tamamen aynıdır. Türkiye dışında bu yönetmeliği değiştirmeden olduğu gibi kullanan başka ülkeler de vardır. Örneğin, Avrupa'nın inşaat ve sanayi sektöründe en gelişmiş ülkelerinden biri olan Almanya da 2009/104/EC sayılı AB direktifini aynı şekilde kullanmaktadır.

Avrupa ve Türkiye'de birebir aynı uygulanan bir başka yönetmelik Kişisel Koruyucu Donanım Yönetmeliğidir. Ülkemizdeki bu yönetmelik Avrupa'daki 2016/425 sayılı Avrupa Parlamentosu ve Konsey yönetmeliğini dayanak alarak hazırlanmıştır. İskelelerde malzeme veya insan düşmesi kaynaklı yaralanma ve ölümler çok olduğundan kişisel koruyucu ekipmanlar çok önemlidir. İlgili yönetmelikte düşmelerden kaynaklı kazaların önüne geçilebilmesi için vücut emniyet kemerlerinin öneminden bahsedilmiştir.

Yapı İşlerinde İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetmeliği de 92/57/EEC Avrupa Konsey Direktifi temel alınarak hazırlamıştır. Ancak ülkemizdeki yönetmelikte iskeleler, düşen cisimler, geçitlerde güvenlik ve yüksekte geçici çalışma ile ilgili konular hakkında ilaveler yaparak yönetmeliği detaylandırmıştır. Daha detaylı incelemek gerekirse, genel hatları itibariyle iki yönetmelik birbirine benzer olsa da içerik olarak önemli farklar mevcuttur. Avrupa'daki yönetmelik 4 ekten oluşurken Türkiye'deki yönetmelik 31 Aralık 2018'deki değişiklikle 5 ekten oluşmaktadır. Türkiye'deki yönetmeliğin EK-4A kısmında "Yapı alanındaki çalışma yerleri için genel asgari şartlar" başlığı altında yüksekte çalışma, düşen cisimler gibi bölümler Avrupa direktifinde EK-4B Bölüm-II'de "Açık Mekânlardaki Çalışma Yerleri" başlığı altında yer almaktadır. Türkiye'deki yönetmelikte yüksekte çalışmayla ilgili seviye farkı bulunan ve düşme sonucu yaralanma ihtimalinin oluşacağı alan olarak tanımlama yapılmıştır. Bu tanımlama Avrupa direktifinde yoktur. Ülkemizdeki yönetmeliğin daha kapsayıcı olduğu bir diğer husus geçitlerde güvenlik kısmıdır. Bu kısımda çalışma platformları ve geçitlerin çalışanların düşmesine veya düşen cisimlere karşı uygun yapılmasına değinilmiştir. Avrupa'daki direktifte geçit güvenliği başlıklı bir bölüm yoktur ama tabi ki başka bölümlerde örneğin düşen cisimler kısmında bu konuya benzer durumlara değinilmiştir. Düşen cisimler kısmında ülkemizdeki yönetmelikte 5 madde varken

Avrupa direktifinde 3 madde vardır. 3 madde ortak konulara değinmektedir. Örneğin, malzemelerin düşmesini engelleyecek önlemler alma, düşen cisimlere karşı toplu koruma oluşturma ve tehlikeli bölgelere girişlerin engellenmesi ya da kapalı geçitler oluşturma gibi hususlar iki yönetmelikte de aynıdır. Türkiye'deki yönetmelikte farklı olan 2 maddenin birinde çalışanlar için baş koruyucu ekipman kullanılmasından bahsedilirken diğer maddede malzemelerin yüksekten yere bırakılmaması uygun şekilde yere indirilmesinden bahsedilmektedir. Aynı yönetmeliğin EK-4B Bölüm-II kısmında ülkemizde "Seyyar erişim ve çalışma kulelerinde özel tedbirler" ve "Asılı erişim donanımlarında (asma iskeleler) özel tedbirler" başlıkları ve EK-5A kısmında "Ön Yapımlı Bileşenlerden Oluşan Cephe İskeleleri için Asgari Şartlar" başlığı altında toplam 39 maddelik bir yönerge vardır. Avrupa Birliği direktifinde ise "İskele ve merdivenler" başlığı altında sadece 5 madde bulunmaktadır.

5.3.1. Ülkemizdeki Yönetmeliklerde Olup AB Ülkeleri İş Güvenliği Mevzuatında Olmayan Hususları

Ülkemizdeki mevzuat kaynaklarında olup da AB Ülkelerindeki mevzuatta göremediğimiz ve farklılıklar olarak niteleyebileceğimiz alanalar aşağıda sıralanmıştır:

- İskele bağlantı yerlerinin sağlamlığı,
- İskelenin taşıyabileceği maksimum ağırlık bilgisinin görünür bir yere asılması,
- İş makinelerine yüklenen malzemelerin iskeleye takılmaması için gerekli önlemler alınması,
- İskelelerin yeteri kadar çapraz elemanla takviye edilmesi,
- Asma iskelelerin hareket etmeyecek şekilde sabitlenmeli,
- Çalışma platformlarda el merdiveni kullanılmaması,
- İniş çıkışlarda engellerin olmaması,
- Dikey yaşam hatlarının oluşturulması

Ülkemizde yüksekte çalışmalar için geçerli olan Yapı İşlerinde İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetmeliği her ne kadar AB direktifini dayanak olarak alsa da içerik olarak AB direktifine göre daha kapsayıcıdır. Bu yönetmelikte asıl detay farkını oluşturan kısım EK-5 kısmıdır. Yapı İşlerinde İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetmeliğine 2018'deki değişiklikle EK-5 bölümü "Yapı İşlerinde Kullanılan İş Ekipmanlarının Asgari Sağlık ve Güvenlik Şartları" kısmı eklenmesiyle ülkemizdeki

yönetmelik farklı bir boyut kazanmıştır. Bu kısımda güvenlik ağları, yaşam hatları, sütunlu çalışma platformu ve cephe iskeleleri için asgari güvenlik şartlarından bahsedilmiştir. Burada bahsedilen gerekler hali hazırda bulunan Avrupa Standartlarına paralel hazırlanmış olup ekipmanların tasarım, kullanım ve kontrollerine yönelik bilgiler verilmiştir.

AB ülkeleri; 97/57/EEC sayılı AB direktifini Türkiye gibi detaylandırmamıştır. Örneğin, Almanya'da "Şantiyelerde Güvenlik ve Sağlığın Korunmasına İlişkin Yönetmelik" ve "İş Yerleri Yönetmeliği" başlıklı iki yönetmelik, geçici veya mobil şantiyelerde geçerli güvenlik ve sağlık koruması için minimum gereklilikler hakkında 92/57/EEC AB direktifinin uygulanmasını istemektedir. Bu iki yönetmelikte iskeleler ile ilgili ekstra gerekler bulunmamaktadır. Fark olarak değerlendirebileceğimiz tek kısım Almanya'daki iş yerleri yönetmeliğinde 2.1 maddesinde düşmeleri önleme ve düşen nesnelerden korunma hakkında 3 maddelik kısa bir bilginin verilmiş olmasıdır. Ayrıca 1 metreden fazla olan yerler düşme tehlikesi kapsamında değerlendirilmiştir. 92/57/EEC sayılı direktif özelinde kıyas yapacak olursak ülkemizdeki direktifin fazlasıyla yeterli olduğu apaçık ortadadır.

Türkiye ve Avrupa ülkeleri arasındaki mevzuat farklarından bir diğeri ise ahşap iskelelerle ilgili olan mevzuatlardır. Ülkemizde 13,5 metreden az olan yüksekliklerde ahşap iskele kullanımı yasaldır. Ancak AB ülkelerinde ahşap iskele kullanımı olmadığı için herhangi bir yasal düzenleme bulunmamaktadır. AB ülkelerinde ahşap iskele olmamasını ekonomik refah, güvenlik şartları ve iklim koşulları gibi sebeplerle ilişkilendirebiliriz.

Türkiye'de ve Avrupa'da yüksek riskli iş ekipmanlarının incelendiği ürün güvenliği yönetmeliklerinde yapı iş iskelelerine yer verilmemiştir. Daha güvenli iskele kullanımının güvencesi için iskelelerde bir ürün güvenliği yönetmeliği gerekmektedir.

Türkiye ve Avrupa Birliği ülkelerindeki standartlar ve mevzuatlar benzer olduğu halde iş kazalarından kaynaklı ölümlerde maalesef ülkemizdeki oran Avrupa'ya göre çok yüksektir. Bunun sebeplerinden birisi inşaatlarda İSG yönetmeliğini uygulamakla yükümlü olan müteahhitlerin öncelikle dikkate aldıkları hususun inşaatın maliyeti olmasıdır. Özellikle yap-sat olarak tabir edilen inşaat sisteminde, güvenli iskele kurulumu ve şantiyelerde güvenlik tedbirlerinin alınması hususları inşaat maliyetini arttıran durumlar olarak yorumlanmaktadır. Bununla birlikte, inşaatlardaki dış cephe imalatları müteahhitlerce taşeron şirketlere verilmektedir. Bu kapsamda düşünülecek olursa, müteahhit ile taşeron şirket arasında yapılan iş sözleşmesinde İSG mevzuatının şartları taşeron şirketlere yüklenmek-

tedir. Bu durum asıl işveren alt işveren arasındaki sorumlulukların paylaşımı noktasında hukuki sorunlar ortaya çıkarmaktadır. Yaklaşık 82 milyon nüfusa sahip ülkemizde T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı'nın 2020 yılı verilerine göre yaklaşık 450 binin üzerinde yetki belgesine sahip müteahhit mevcuttur. Bu rakam 450 milyon nüfuslu Avrupa Birliği'nde bulunan sayının neredeyse 10 katıdır. Böyle bir tabloda inşa edilen yapılarda maliyetlerin düşürülmesi amacıyla ilk olarak ekipman ve yetkin iş gücünden kaçınılacağı bariz bir şekilde ortadadır. Yıllardır "güvenli iş iskelesi", "iş sağlığı ve güvenliği" gibi iş hayatımızda yer alan ve işçilerin can güvenliğini ilgilendiren bu konuları es geçen müteahhitlik sisteminin iskele kurulumunda alınması gereken tedbirleri uygulamada zorluk çekeceği bellidir. Bu durum, ülkemizde inşaat sektöründeki iş kültürünün düşük düzeyde olması ile açıklanabilir (Bayraktar, 2017)

6. Sonuçlar ve öneriler

İş kazaları ve bu kazalardan kaynaklı ölümlerde inşaat sektörü ilk sıralarda gelmektedir İnşaat sektöründeki bu kazaları en aza indirmek için öncelikle kaza sayısı ve ölüm verilerinin en doğru şekilde toplanarak analiz edilmesi gerekir. İnşaat sektörü alt gruplarıyla birlikte ayrı ayrı incelenmeli ve her grup için detaylı raporlar oluşturulmalıdır. Bu veriler günümüzde hem Türkiye'de hem de Avrupa Birliği ülkelerinde geçmişe göre daha şeffaf ve sağlıklı bir şekilde kayıt altına alınmaktadır. Bu sayede en yüksek kaza sayılarının olduğu alt gruplarda gerekli önlemler alınabilmektedir.

İskelelerden kaynaklı kazalar için önlemler alınmasına rağmen kaza sayıları hala yüksektir. İskelelerde gerekli tedbirlerin uygulanmaması, çalışan ve işverenin dikkatsizliği, bilinçsizliği ve sorumsuzluğu, geçmişte yaşanan kazaların ve ölümlerin unutulması, iskele sistemlerinin gereğinden fazla kullanılarak deforme olması ve korozyona uğraması, standartlardaki minimum değerlerde platform, korkuluk, topuk levhası ve ağ sistemlerinin bulunmaması ya da özensiz uygulanması, statik elektriğe karşı topraklamanın yapılmaması, merdiven sistemlerinin kullanılmaması, iskelenin uygun zemine doğru ekipmanlarla kurulmaması ve binaya sabitlenmemesi, çalışanların kişisel koruyucu ekipmanlarını kullanmaması ve işverenin yüksek maliyetli ekipmanlardan kaçması gibi birçok etken maalesef kazalara sebep olmaktadır.

Türkiye, tüm kaza sebeplerini kapsayıcı ve Avrupa Birliği standartlarına uygun yüksekte çalışma alanlarında, özellikle iş iskeleleri anlamında, yeterli denilebilecek bir mevzuata sahiptir. Mevcut yönetmelikler bu kadar kapsayıcıyken hala bu kazaların çok yüksek sayılarda olması sadece Türkiye'nin değil Av-

rupa'nın da sorunudur. Türkiye ve Avrupa'daki iskelelere yönelik standartlar birebir aynıyken bazı Avrupa ülkelerinin ulusal yönetmeliklerinde ufak değişiklikler bulunmaktadır.

Türkiye ve Avrupa Birliği ülkelerindeki dış cephe iş iskelesi standartlarındaki en büyük fark; Türkiye'de ahşap iskelelerle ilgili TS 13662 standardı varken Avrupa'da ahşap iskele kullanımı olmadığından herhangi bir standart ve yasal düzenlemenin olmamasıdır. Avrupa'da ahşap iskele kullanılmamasının ana sebebini; bu ülkelerin ekonomik olarak çelik iskele, makaslı çalışma platformu gibi daha maliyetli ekipmanları kullanması, yoğun yağış alan bölgelerde iklim şartları ve çelik iskele, mobil iskele gibi diğer ekipmanların kullanımının daha pratik ve güvenli olması ile ilişkilendirilebilir. Ülkemizde de iskelelerden kaynaklı kazaların azaltılabilmesi için ahşap iskele kullanımının yasaklanması ve ön yapımlı çelik iskelelerin kullanımının yaygınlaştırılması sağlanmalıdır.

Ülkemizdeki bir diğer yönetmelik olan İş Ekipmanlarının Kullanımında Sağlık ve Güvenlik Şartları Yönetmeliği dayanak olarak 2009/104/EC Avrupa Direktifini almıştır ve bu yönetmelik direktif ile bire bir aynıdır. Buna ek olarak Kişisel Koruyucu Donanım Yönetmeliğindeki düşmeler konusu Avrupa'daki 2016/425 sayılı Avrupa Parlamentosu ve Konsey Yönetmeliğindeki kısımdan çevrilmiştir ve aynı şekilde kullanılmaktadır. Görüldüğü üzere Avrupa Birliği'nden alınan her yönetmelik ülkemizde değiştirilip detaylandırılmamıştır. Bazı yönetmeliklerin olduğu gibi kullanılması, anlaşılırlığının bozulmaması için önemlidir. Bu iki yönetmelik bunun en iyi örnekleridir.

Yapı iş iskeleleri hakkında yürürlükte olan yasal düzenlemeler, güvenli iş iskelesi bileşenleri ve ekipmanlarının imalatını da geliştirmiştir. Günümüzde güvenli iskele kurulumu için ekipmana ve yetkin iş gücüne ulaşmakta sorun yaşanmamaktadır. Ancak mevzuatta zorunlu olan standartlar dışında üretilen ve uygulamasında bir cezai yaptırım bulunmayan iskeleler güvenli iskelelere göre kısa vadede daha ucuz olduğu için tercih edilmektedir.

İskelelerden düşme kaynaklı kazalarda çalışanların güvensiz davranışlarının da göz ardı edilmemesi gerekir. Özellikle iş iskelelerinde çalışanların yüksekte çalışma ve iskeleler konusunda yeterli eğitime sahip olmadıkları söylenebilir. Bu tip kazalardaki çalışan kaynaklı hataların azaltılmasında iş sağlığı ve güvenliği eğitimleri büyük önem taşımaktadır. Özellikle yüksekte ve iskelelerde çalışma konusunda uygulamalı eğitimlerin daha detaylı olarak planlanıp uygulanması gerekmektedir. Ayrıca çalışanların bu eğitimler sonucunda elde ettikleri kazanımlarını uygulayabilme seviyeleri de denetlenmelidir.

Ülkemizde yetki belgeli müteahhit sayısı çok olmasına rağmen, bu müteahhitlerin birçoğu inşaat maliyetini düşük tutmak için özellikle iş iskelesi gibi güvenlik gerektiren ekipmanları seçerken fiyatının düşük olmasından dolayı standartlara uygun olmayan ekipmanları seçebilmektedir. Öncelikle ülkemizde müteahhitlik sisteminde düzenleme yapılmalı ve müteahhit sayısının azaltılarak yetkin müteahhit sistemi oluşturulmalıdır. Bu sayede inşaat sektöründe iş güvenliğine önem veren müteahhitlerin sayısı arttırılabilir. Öte yandan standartlara uygun olmayan iskelelerin kullanımının önüne geçilebilmesi için denetimler daha sık ve etkin yapılmalı, ayrıca cezai yaptırımlar daha katı bir şekilde uygulanmalıdır.

Sonuç olarak, her sektörde yüksekte çalışmaların güvenli bir şekilde yapılabilmesi hem Türkiye'de hem de Avrupa'da iş güvenliği açısından büyük önem taşımaktadır. Yüksekte çalışma alanlarında işçisinden işverenine kadar, denetimi yapan uzman kişilerden mevzuata uygunluğu denetleyen iş müfettişlerine kadar tüm paydaşların bu konuda bilinçlendirilmesi gerekmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında Dr. Öğr. Üyesi Osman AYTEKİN Danışmanlığında Yüksek Lisans yapan Gökhan DEĞİRMENCİOĞLU'nun yüksek lisans tez çalışmasından üretilmiştir.

Kaynakça

Bayraktar, E., Bayraktar, D., (2017), "Yapım İşlerinde Dış Cephe İş İskelelerine Yönelik Yasal Düzenlemeler ve Uygulama Örnekleri", Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 8(1), 8-18.

Ceylan, H., (2014), "Türkiye'de İnşaat Sektöründe Meydana Gelen İş Kazalarının Analizi", International Journal of Engineering Research and Development, 6(1), 1-6.

Council Directive 89/391/EEC, Official Journal of the European Communities, 1989.

Council Directive 92/57/EEC, Official Journal of the European Communities, 1992.

Çiçek, O. Öçal, M., (2017), "Türkiye ve Avrupa Birliği'nde İş Kazası Verilerinin Karşılaştırmalı Analizi", Hak İş Uluslararası Emek ve Toplum Dergisi, 6(16), 616-637.

Directive 2001/45/EC of the European Parliament and of the Council, Official Journal of the European Union, 2001.

Directive 2009/104/EC of the European Parliament and of the Council, Official Journal of the European Union, 2009.

Erdiş, E., Coşkun, H., Gerek, İ., (2011), "Yapım İşlerinde İskele Kurulumu ve İş Güvenliği İlişkisi", 3. İşçi Sağlığı ve İş Güvenliği Sempozyumu, 285-292.

Ertekin, Y., (2014), "İnşaat İskelelerinde İş Sağlığı ve Güvenliği", Uzmanlık Tezi, Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı İş Sağlığı ve Güvenliği Genel Müdürlüğü, Ankara.

Eurostat, "European Statistics on Accidents at Work (ESAW)", Erişim tarihi: 08.01.2022, http://europa.eu.int/comm/eurostat.

İş Ekipmanlarının Kullanımında Sağlık ve Güvenlik Şartları Yönetmeliği, T.C. Aile, Çalışma ve Sosyal Hizmetler Bakanlığı, 25.04.2013 Tarihli Resmi Gazete No.28628, 2013, Ankara.

Kişisel Koruyucu Donanım Yönetmeliği, T.C. Aile, Çalışma ve Sosyal Hizmetler Bakanlığı, 02.07.2013 Tarihli Resmi Gazete No:28695, 2013, Ankara.

Regulation (EU) 2016/425 of European Parliament and of the Council, Official Journal of the European Union, 2016

T.C. Aile, Çalışma ve Sosyal Hizmetler Bakanlığı İş Sağlığı ve Güvenliği Genel Müdürlüğü, "Cephe İskelelerinde İş Sağlığı ve Güvenliği", Erişim tarihi:01.08.2023, https://guvenliinsaat.csgb.gov.tr/media/aqzfj03c/cephe_iskeleleri.pdf

TS 13662 Ahşap Bileşenlerden Oluşan Dış Cephe İş İskeleleri, Türk Standartları Enstitüsü, 2015, Ankara.

TS EN 12810 Ön Yapımlı Bileşenlerden Oluşan Cephe İskeleleri, Türk Standartları Enstitüsü, 2005, Ankara.

TS EN 12811 Geçici İş Donanımları - Bölüm 1: İş İskeleleri, Bölüm 2: Malzeme Bilgileri, Bölüm 3: Yükleme Deneyleri, Türk Standartları Enstitüsü, 2005, Ankara.

Yapı İşlerinde İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetmeliği, 2013, T.C. Aile, Çalışma ve Sosyal Hizmetler Bakanlığı, 05.10.2013 Tarihli Resmi Gazete No:28786, Ankara.

Yazıcı, M., "İskelelerin Periyodik Kontrolü", Mühendis ve Makina, Cilt.55 Sayı.658, s.34., 2014.

340/1994 Construction Worker Protection Regulation, Regulation of Federal Minister for Labour of Austria, 1994.

BÖLÜM 16

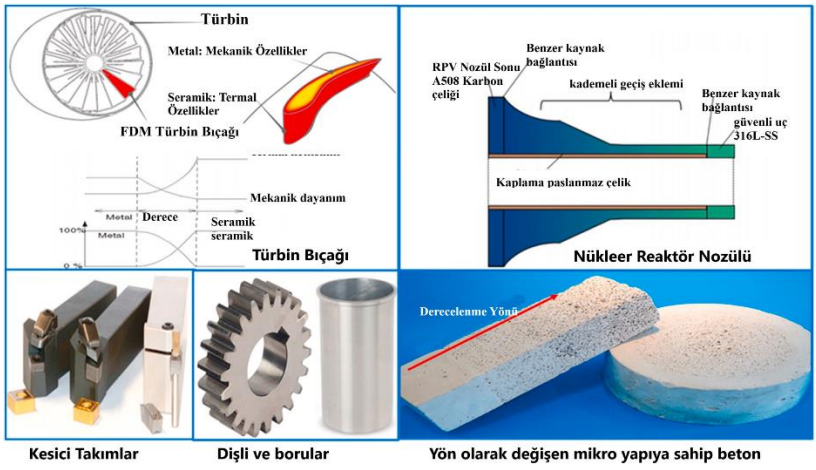
Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemeler ve Bu Malzemelerin Eklemeli İmalat Yöntemiyle Üretimi

Yusuf Fedai[1] & Hediye Kırlı Akın[2]

[1] Doç. Dr., Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, ORCID:0000-0003-4546-8830
[2] Dr. Öğretim Üyesi, Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, ORCID: 0000-0003-4862-9054

1- Fonksiyonel Dereceli Malzemeler.

Malzemeler, insan bilimsel ve teknolojik ilerlemesi ve sosyal gelişimi için önemli bir temeldir ve gelişmiş malzemelerin geliştirilmesi ve yeniliği, modern üretimin çekirdeğini oluşturur(WU et al., 2021). Üretim endüstrisinin hızlı gelişimiyle birlikte, geleneksel homojen malzemeler, bileşen yapısı ve işlevinin karmaşıklık ve çeşitlendirme gereksinimlerini karşılayamamıştır. Özellikle endüstride, geleneksel homojen malzemelerin uygulanmasının kısıtlamaları nedeniyle, ihtiyaç duyulan uygulamaların gereksinimlerini karşılamak için derecelendirilmiş bir yapıya sahip karşıt özelliklere sahip yeni malzemeler geliştirmek gerekliliği ortaya çıkmıştır(Saleh et al., 2020). Şekil 1' de FDM uygulama örneklerinden kesitler verilmektedir.

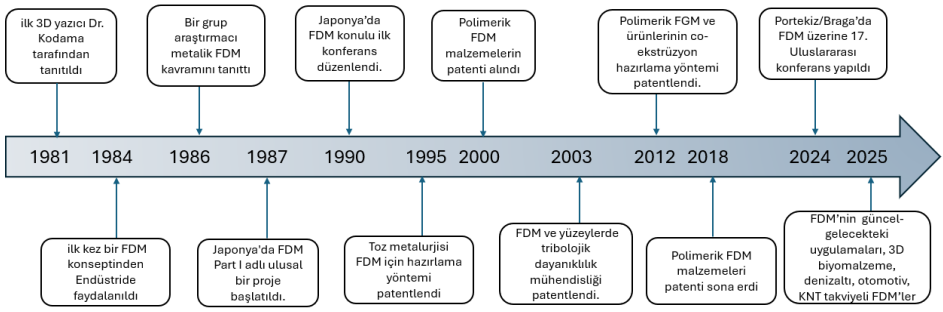


Şekil 1. FDM uygulama örnekleri(Saleh et al., 2020)

Her biri kendi avantaj ve dezavantajlarına sahip çok çeşitli malzemeler kolayca bulunabildiğinden, iki belirgin şekilde farklı malzemeyi birleştirmek üreticiler için giderek daha değerli hale gelmiştir. İki farklı malzemeyi birleştirmek, her malzemenin avantajlarının uygulama için arzu edilir olduğu anlamına gelmez; bazen dezavantajlarından da yararlanılır. Yaygın olarak kullanılan bir örnek, son derece aşındırıcı bir ortamda bulunan bir şanzıman dişlisinin üretilmesidir. Dişlinin tamamını, geleneksel olarak üretilmesi doğal olarak zor olan kırılgan bir seramik gibi aşınmaya dayanıklı bir malzemeden üretmek yerine, dişlinin büyük kısmı kolayca üretilen bir metalden yapılabilir ve aşınmaya dayanıklı seramik, yalnızca yüksek aşınma yerlerine kompozit kaplama olarak uygulanabilir (Bandyopadhyay & Heer, 2018).

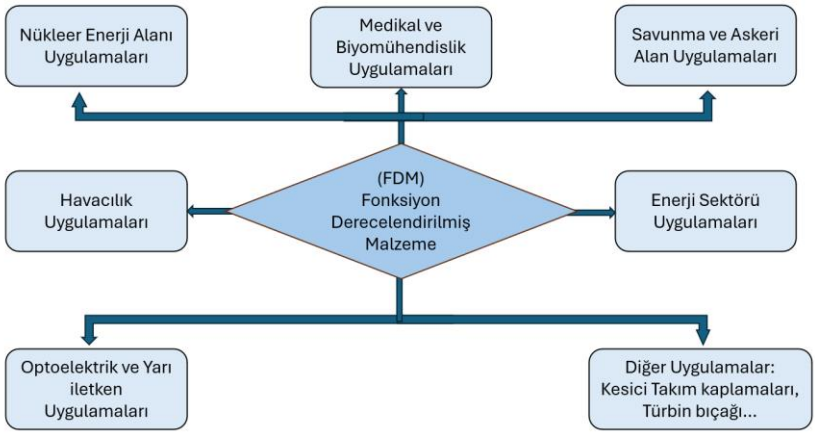
Fonksiyonel olarak derecelendirilmiş malzemeler (FDM), kimyasal bileşimi, mikro yapısı ve atomik düzeni malzemelerin uzunluğu, kalınlığı veya diğer belirli yönü boyunca sürekli veya yarı sürekli olarak değişen ve malzemelerin fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri aynı yön boyunca sürekli veya yarı sürekli olarak değişen özel işlevlere sahip yeni biyomimetik malzemeler olarak tarif edilebilir(Liu, Meyers, Zhang, & Ritchie, 2017; Sarathchandra, Subbu, & Venkaiah, 2018; Xue et al., 2020). FDM'ler, malzeme biliminde önemli bir ilerlemeyi temsil eder ve bileşim ve mikro yapıda sürekli bir değişimle karakterize edilir ve bu da özel fonksiyonel özelliklere yol açar. Bu yenilikçi yaklaşım, polimerler, metaller ve seramikler gibi farklı malzemelerin tek bir yapıda birleştirilmesine olanak tanır ve böylece geleneksel malzemelerde yaygın olan termal kalıntı gerilimler ve mekanik uyumsuzluklar gibi sorunları azaltarak performansı artırır(Aydin, Apalak, Gunes, & Reddy, 2014).

Dereceli malzemelerin incelenmesine yönelik ilk tarihsel çaba, 1972 yılında M.I.T. metalürji uzmanı M.B. Bever tarafından yapılmıştır. 1984 yılında Dr. M. Ninno, A. Kumakawa ve Japonya'daki diğer malzeme bilimcileri, termal bariyer malzemeleri geliştirmenin bir yolu olarak FGM'lerin tasarlanmasını önermişlerdir. FGM kavramı, 1987 yılında Japonya tarafından “Termal Gerilimlerin Gevşemesi İçin Fonksiyonel Eğimli Malzemenin Geliştirilmesine Yönelik Temel Teknolojinin Araştırılması” başlıklı ulusal bir girişimle tanıtıldı. Araştırmanın amacı, seramiklerin refrakterliği ve metallerin tokluğu gibi uyumsuz özellikleri termal gerilimlerin gevşemesiyle birleştirerek uzay aracının tahrik sistemi ve gövdesi için aşırı ısınmaya dayanıklı malzemeler geliştirmektir(Teacher & Velu, 2024). Bu çalışma, gradyan malzemeler üzerine ilk detaylı araştırmanın yapılmasına neden oldu ve sonrasında bileşen boyunca kimyasal bileşimi/mikroyapıyı da kontrol eden ve FGM'ler olarak bilinen dereceli özelliklere sahip kompozitlerle sonuçlanan özellik derecelendirmesini kontrol etmek için kapsamlı araştırma çalışmaları yapılmıştır. O zamandan beri, birçok araştırmacı FDM'ler üzerinde araştırmalar yürütmüştür. Yapılan çalışmalar son olarak 2024 yılında Portekiz / Braga’da yapılan 17. Uluslararası Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemeler sempozyumunda tartışılmıştır. Şekilde 2’de FDM teknolojisinin tarihsel gelişimi ile ilgili bir akış şeması görünmektedir



Şekil 2. FDM teknolojisinin tarihsel gelişimi (Alkunte et al., 2024)

FDM yapısındaki malzemeler güçlü bir tasarım kabiliyetine sahiptir ve malzemelerin özellikleri ve işlevleri, havacılık, elektronik optik, enerji mühendisliği, petrokimya mühendisliği, biyomedikal mühendisliği ve diğer alanlarda geniş kullanım elde etmek için karmaşık ve çeşitli yapısal ve işlevsel gereksinimleri karşılamak üzere malzemenin form ve biçimine göre farklılıklar gösterebilir(Gupta & Talha, 2015; Zhang, Jiang, Xue, & Yu, 2022). Araştırmalar gelişmeye devam ettikçe, Şekil 3'te gösterildiği gibi, FDM'lerin havacılıktan biyomedikal mühendisliğe kadar çeşitli endüstrileri etkileme potansiyeli önemli olmaya devam ederek malzeme biliminde gelecekteki yeniliklerin önünü açmaktadır.



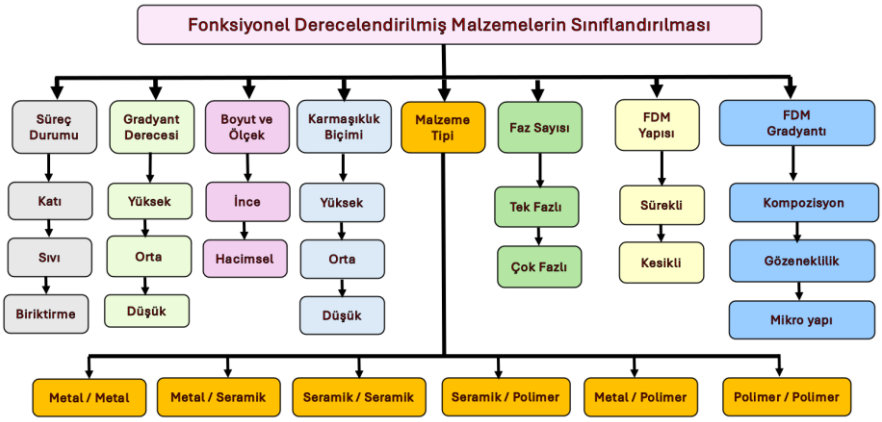
Şekil 3. FDM'lerin uygulama alanları (Naebe & Shirvanimoghaddam, 2016)

FDM'ler, Biyomateryal implantlar, termal bariyerler, enerji dönüşümü için malzemeler, metal kesme ve kaya delme aletleri, dişliler gibi mekanik elemanlar ve optik ve optoelektronik uygulamalar gibi çeşitli uygulamalar için umut verici adaylardan biridir. Toz metalurjisi (PM), santrifüj döküm, termal veya plazma

püskürtme, elektrokimyasal işleme ve kimyasal buhar biriktirme (CVD) ve fiziksel buhar biriktirme (PVD) dahil olmak üzere bir dizi FGM üretim tekniği mevcuttur(Parihar, Setti, & Sahu, 2018). Geleneksel üretim yöntemlerinin birçok avantajı olmasına rağmen, pratik uygulamalarda birçok sınırlamaları da vardır. Örneğin, fiziksel ve kimyasal buhar biriktirme yöntemleri yalnızca yüzey kaplamaları oluşturabilir ve blok kaplamaları oluşturmak için uygun değildir, santrifüj döküm yalnızca silindirik bileşenler üretebilir, toz metalurjisi yalnızca yüksek gözenekliliğe sahip nispeten basit yapılar üretebilir ve kendiliğinden yayılan yüksek sıcaklık sentez yöntemi malzeme seçimiyle sınırlıdır. Bu sınırlamalar FDM'lerin daha fazla geliştirilmesi ve endüstriyel uygulaması için bir engel haline gelmiştir. Bu nedenle FDM'lerin hazırlanması için yeni yöntemler keşfetmek gereklidir.

2- Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin sınıflandırılması

FGM veritabanı, araştırmacılar ve metalurjistler tarafından belirli bir uygulamanın gereksinimlerine odaklanarak çalışmaları ve araştırmaları yoluyla sürekli olarak zenginleştirilmiştir. Bu nedenle, yeni gelişmelerle birlikte, zaman zaman yeni FGM sınıflandırma şemaları önerilmektedir. İlk aşamalarda, ana odak noktası, yeni FGM üretim yöntemlerinin geliştirilmesini gerektiren gerekli işlevlerin toplanması için farklı malzemelerin birleştirilmesiydi. Bu nedenle, ilk sınıflandırma, FDM üretmek için birleştirilen malzeme türüne ve ilgili üretim yöntemlerine göre yapılmıştır(Kumar, Sharma, & Singh, 2023). Ancak araştırmacılar ve endüstrideki uygulamacılar FDM'ler için farklı özelliklerin gösterildiği çok sayıda sınıflandırmalar önermişlerdir. FDM malzemeler genel olarak, süreç durumuna, gradyan derecesine boyut ve ölçeğine, karmaşıklık biçimine, Malzeme tipine faz sayısına FDM yapısına ve FDM gradyanına göre sekiz farklı biçimde sınıflandırılabilir. Şekil 4'te literatüre göre verilen bir sınıflandırma biçimi görülmektedir.

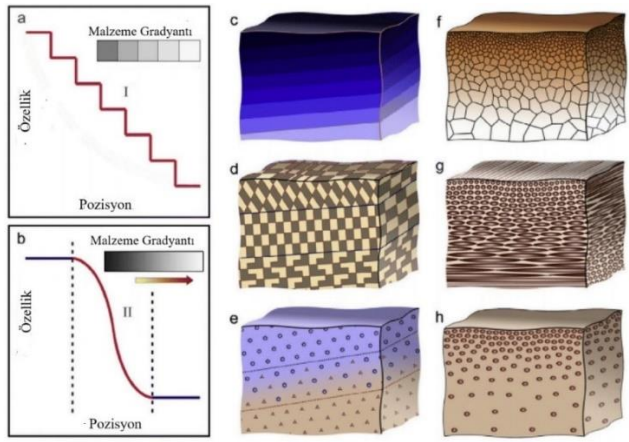


Şekil 4. FDM nin Sınıflandırılması(Kumar et al., 2023)

FGM işleme durumuna göre, yöntemler genel olarak katı hal süreçleri, sıvı hal süreçleri ve biriktirme süreçleri olarak sınıflandırılabilir. Biriktirme yöntemleri, yüksek doğruluk ve küçük ürünler için kullanılan oldukça gelişmiş teknolojileri temsil eder. Sıvı hal süreçleri genellikle nispeten daha düşük özellik kontrolüne sahip büyük ürünler için kullanılırken, katı hal stresli termo-mekanik bileşenler için kullanılır(WU et al., 2021).

Yapısına göre FDM'ler sürekli ve kesikli gradyan olmak üzere ikiye ayrılır. Sürekli gradyanda malzeme içindeki bileşenler ayırt edilemezken ayrık FDM olarak bilinen kesikli kademeli derecelendirme de malzeme bileşenleri katmanlar şeklindedir.

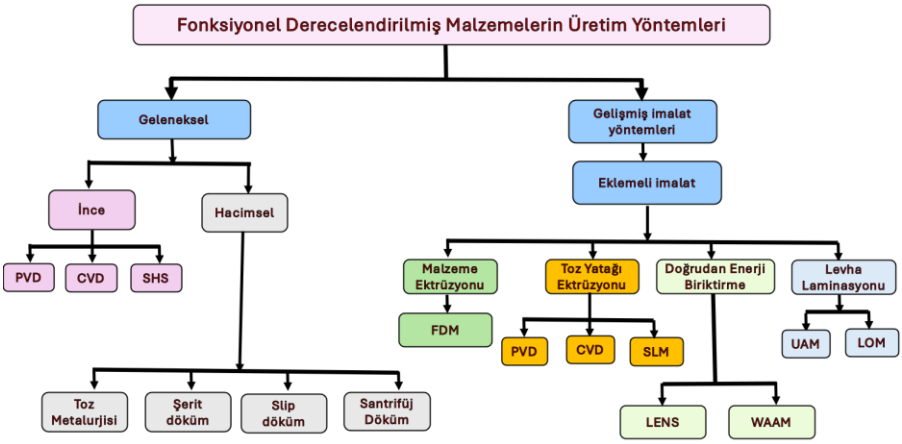
Şekilde 5'de farklı gradyan biçimlerine sahip işlevsel olarak derecelendirilmiş malzemeler şematik olarak görülmektedir(Leu et al., 2012).



Şekil 5: işlevsellik yönünden malzeme gradyanı. **a** Arayüzlü ayrık/kesikli FDM'ler. **b** Arayüzü olmayan sürekli FDM'ler. **c** , **f** Bileşim gradyanı. **d** , **g** Yönlendirme gradyanı. **e** , **h** Kesir gradyanı(El-Galy, Saleh, & Ahmed, 2019).

3- Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin üretim yöntemleri

Geliştirilen yapıda ihtiyaç duyulan tasarım, işlev ve özelliklere bağlı olarak, FGM'lerin imalatı için çok sayıda üretim yöntemi mevcuttur (Şekil 6). FGM üretim yöntemleri iki kategoriye ayrılabilir: ilk kategori geleneksel üretim yöntemleri, ikinci kategori ise gelişmiş üretim yöntemleridir. FDM'lerin ilk ortaya çıkışında geleneksel yöntemler kullanılmıştır. Bu yöntemler ince kaplama şeklinde, özellikle kesici takımların imalatında büyük gelişmeler ortaya koymuştur. Yeni geliştirilen bu yöntemlerle malzemenin işlenmesinde takım ömründe belirgin bir gelişme görülürken işlenen yüzeyin kalitesi, kesme ve ilerleme hızlarındaki artışlar da talaşlı imalatta önemli gelişmeler olarak kabul edilmektedir. Gelişmiş imalat yöntemleri olarak ise eklemeli imalat, fonksiyonel olarak derecelendirilmiş yapıları üretmek için kullanılan gelişmiş üretim yöntemlerinin en popüler kategorisidir. Eklemeli imalat yöntemlerinde, malzeme genellikle tel, toz ve sac formunda, derecelendirilmiş yapılara sahip üç boyutlu parçalar üretmek için kullanılır. Bu yöntemler ayrıca FDM'lerin ince ve kalın yapılarının üretimi için de kullanılır. Geleneksel yöntemler gibi, gelişmiş üretim yöntemleri de çeşitli kategorilere ayrılabilir. FDM üretimi için Eİ yöntemlerinin levha laminasyonu, toz yatak füzyonu, doğrudan enerji birikimi ve malzeme ekstrüzyonu olarak dört gruba ayrıldığı görülmektedir.



Şekil 6: FGM için üretim yöntemlerinin sınıflandırılması(Kumar et al., 2023)

Not: şekilde verilen kısaltmaların ingilizce orijinal şekliyle alınmıştır. PVD: Fiziksel buhar biriktirme, CVD: Kimyasal buhar biriktirme, SHS: Kendiliğinden yayılan yüksek sıcaklık sentezi, SHS: Seçici ısı sinterleme, TC: Bant döküm, EBM: Elektron ışını eritme, UAM: Ultrasonik katkı maddesi üretimi, LOM: Lamine nesne üretimi, FDM: Erimiş biriktirme modelleme, SLM: Seçici lazer eritme, LENS: Lazerle tasarlanmış ağ şekillendirme, WAAM: Tel ark katkı maddesi üretimi

4- Fonksiyonel olarak derecelendirilmiş malzemelerin eklemeli imalat (FDM-Eİ) yöntemiyle üretimi

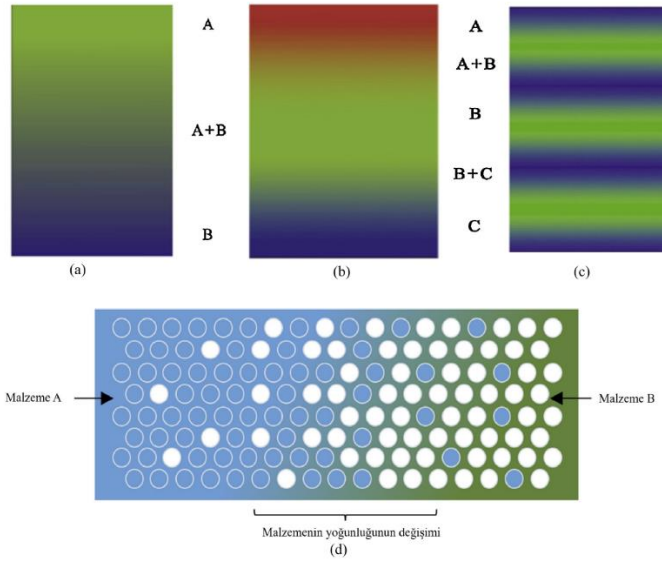
Eklemeli imalat süreci öncelikle bilgisayar destekli tasarım (CAD) yazılımı kullanılarak bir 3B bileşen tasarlanarak başlar; bu yazılım modeller oluşturmak, malzemeleri atamak ve yapısal, termal ve diğer performans analizlerini yürütmek için kullanılabilir. Daha sonra 3B parça, ilk katmanın düz bir yüzey üzerine üretilmesiyle başlayan gerçek inşa süreci için kullanılan dilimlenmiş bir biçime dönüştürülür. Bu katman tamamlandıktan sonra, üretim sistemi ikinci katmanın birincinin üzerine inşa edilebileceği bir noktaya geçer. Bu süreç, tasarlanan 3B parçayı tam ve doğru bir şekilde, her seferinde bir katman olacak şekilde oluşturmak için katman geometrilerini değiştirerek devam eder. Yüksek çözünürlük yetenekleriyle, her katmandaki karmaşık geometriler daha sonra nihai ürüne entegre edilebilir. Ancak, farklı malzemelerle, birleştirme süreci bazı sınırlamalar göstermeye başlar(Bandyopadhyay & Heer, 2018).

ASTM F42 teknik komitesi tarafından yakın zamanda Eklemeli imalat yöntemleri yedi sınıfa ayrılmıştır(Hardacre & Pei, 2023). Bu yedi sınıf; Küvet (Vat) Fotopolimerizasyonu, Malzeme Püskürtme, Bağlayıcı Püskürtme, Malzeme

Ekstrüzyonu, Toz Yatak Füzyonu, Levha Laminasyonu ve Yönlendirilmiş Enerji Biriktirme olarak sayılabilir(Mahamood, Akinlabi, Mahamood, & Akinlabi, 2017).

Fonksiyonel olarak derecelendirilmiş malzemelerin eklemeli imalatı (FDM-Eİ), malzeme bilimi ve mühendisliğinde önemli bir ilerlemeyi temsil ederek, belirli uygulamalara göre uyarlanmış, mekansal olarak değişen özelliklere sahip bileşenlerin üretimini mümkün kılar. FDM'ler, havacılık, biyomedikal cihazlar ve yapısal bileşenler dahil olmak üzere çeşitli mühendislik uygulamalarında gelişmiş performansa olanak tanıyan bileşim ve mikro yapıda kademeli bir değişiklikle karakterize edilir(Cho, Ho, Jo, & Cho, 2024). Bu teknoloji, geleneksel üretim yöntemlerinin elde edemediği karmaşık geometriler ve malzeme dağılımları oluşturmak için Eİ'nin benzersiz yeteneklerinden yararlanır(Cho et al., 2024). Fonksiyonel derecelendirilmiş eklemeli imalat (FDM-Eİ) süreci, malzeme bileşiminin yapım süreci boyunca kasıtlı olarak değiştirildiği katman katman bir üretim yaklaşımını içerir. Bu yetenek, tek bir parça içinde bir dizi mekanik, termal ve elektriksel özellik sergileyebilen bileşenlerin tasarlanmasına olanak tanır. FDM'lerin tasarımı ve üretimi, malzeme bilimi, makine mühendisliği ve bilgisayar bilimlerinden gelen bilgileri birleştiren disiplinler arası bir yaklaşım gerektirir.

FDM-Eİ 'de bir uçta %0'dan diğer uçta %100'e kadar malzemeler arasında düzgün ve kesintisiz bir geçişi göstermektedir. 3B uzaydaki sürekli değişim, biriktirme sırasında ve kürlemeden önce karıştırılan iki veya daha fazla malzemenin oranlarının kontrol edilmesiyle elde edilebilir. Şekil 7'de bu değişime ait resimler, (a) iki malzeme (b) Üç malzeme (c) Değiştirilmiş kompozisyon (d) Malzemede yoğunluk değişimi şeklinde gösterilmektedir.



Şekil 7. Malzemede gradyan değişimi, (a) iki malzeme (b) Üç malzeme (c) Değiştirilmiş kompozisyon (d) yoğunluk değişimi(Loh, Pei, Harrison, & Monzón, 2018)

FDM-Eİ'ın önemli avantajlarından biri, mekanik özelliklerin belirli gereksinimleri karşılayacak şekilde uyarlanabilmesidir (Arañez ve diğerleri, 2022). Bu uyarlanabilirlik, her gramın önemli olduğu havacılık bileşenleri gibi ağırlık azaltmanın önemli olduğu uygulamalarda çok önemlidir. Dahası, gradyan yapıları oluşturma yeteneği, malzeme parça boyunca gerilim dağılımı için optimize edilebildiğinden, iyileştirilmiş yorulma direncine ve dayanıklılığa yol açabilir. Toz yatak füzyonu ve vat fotopolimerizasyonu gibi katkı üretim teknolojilerindeki gelişmeler, FDM'leri üretme olanaklarını genişletmiştir. Nohut ve Schwentenwein, FDM'ler için vat fotopolimerizasyon tekniklerinin kapsamlı bir incelemesini sunarak, bu yöntemlerin sunduğu esnekliği ve tasarım özgürlüğünü vurgulamışlardır(Nohut & Schwentenwein, 2022). Malzeme özelliklerini mikro yapısal düzeyde değiştirme yeteneği, yüksek sıcaklıklar veya aşındırıcı ortamlar gibi zorlu çalışma koşullarına dayanabilen bileşenlerin oluşturulmasına olanak tanır. Biyomedikal uygulamalar alanında, FDM'ler hasta özelinde implantların ve protezlerin geliştirilmesinde büyük umut vadetmektedir. Doğal kemiğin mekanik özelliklerine yakın implantlar oluşturma yeteneğini, entegrasyonu önemli ölçüde iyileştirebilmekte ve implant başarısızlığı riskini azaltabilmektedir.

Şu anda, tüm Eİ teknolojileri, FDM-Eİ'leri kullanma yeteneğine sahip değildir. Tablo 1'de gösterildiği gibi mevcut Eİ yöntemlerinin FDM-Eİ bileşenlerini başarıyla ürettiği bildirilmiştir. Bunlara malzeme ekstrüzyonu , doğrudan enerji

biriktirme, toz yatak füzyonu , levha laminasyonu ve PolyJet teknolojisi olarak sınıflandırabiliriz.(Loh et al., 2018)

Tablo 1. FGM için destekleyici katkı üretim teknolojileri ve ISO/ASTM'ye göre sınıflandırmaları(Loh et al., 2018).

Eİ Süreci	**Güç kaynağı**	**Tanım**	**FDM-Eİ için Destekleyici Teknikler**	**Malzeme**
Malzeme ekstrüzyonu	Isıl Enerji	Malzeme seçmeli olarak bir nozul veya ekstruder aracılığıyla dağıtılır.	Erimiş birikim modelleme (FDM) Dondurarak form ekstrüzyon imalatı (FEF)	Termoplastikler, seramik bulamaçları, metal macunları
Toz yatak füzyonu	lazer ışını Elektron ışını	Hammadde, bir ısı kaynağı vasıtasıyla biriktirilir ve seçici olarak eritilir veya bir yapıştırıcı vasıtasıyla bağlanarak parçalar oluşturulur.	Seçici Lazer Sinterleme (SLS), Doğrudan Metal Lazer Sinterleme (DMLS), Seçici Lazer Eritme (SLM), Seçici Maske Sinterleme (SMS), Elektron Işını Eritme (EBM)	Poliamid veya polimer, atomize metal tozu, seramik tozu.
Yönlendirilmiş enerji birikimi	Lazer ışını	Isı enerjisi, malzemelerin biriktirilmesi sırasında eritilerek birleştirilmesinde kullanılır.	Lazer Mühendisliği Net Şekil (LENS), Yönlendirilmiş Metal Biriktirme (DMD)	Erimiş metal tozu
Levha laminasyonu	Lazer ışını	Malzeme tabakaları birbirine yapıştırılır ve istenilen 3 boyutlu nesneyi oluşturmak için her katman seçici olarak kesilir.	Lamine Nesne Malzemesi (LOM), Ultrasonik Konsolidasyon (UC)	Plastik film, metalik levha, seramik bant
Malzeme püskürtme	Foto kürleme	Malzeme tabakaları birbirine yapıştırılır ve istenilen 3 boyutlu nesneyi oluşturmak için her katman seçici olarak kesilir.	PolyJet Teknolojisi (PJT)	Fotopolimer dijital malzemeler

Literatürde FDM'lerin üretimi için çok sayıda eklemeli imalat yöntemiyle üretimi için çok çeşitli yöntemler kullanılmaktadır(Ghanavati & Naffakh-Moosavy, 2021). Eklemeli üretim (Eİ), fonksiyonel olarak derecelendirilmiş yapıları üretmek için kullanılan gelişmiş üretim yöntemlerinin en popüler kategorisidir. Eklemeli imalatta malzeme genellikle toz, tel veya saç formunda, derecelendirilmiş yapılara sahip üç boyutlu parçalar üretmek için kullanılır. Bu yöntemler ayrıca FGM'lerin ince ve kalın yapılarının üretimi için de kullanılır. Geleneksel yöntem-

ler gibi, gelişmiş üretim yöntemleri de çeşitli kategorilere ayrılabilir. Araştırmacıların ve üreticilerin şu anda kullandığı bir çok yöntemin avantaj ve dezavantajları Şekil 2'de gösterilmiştir.

Tablo 2. FGM üretiminde kullanılan önemli AM yöntemleri(Kumar et al., 2023)

İşlem/ Malzeme	**Avantajları**	**Dezavantajları/Sınırlamaları**
FDM / Tel	Düşük maliyetli kaynakların kullanıldığı, düşük maliyetli bir yöntemdir; Kontaminasyon ve toksisite riski yoktur.	FDM baskısından sonra yüzey engebelidir ve bu nedenle ek adımlara ihtiyaç duyar; ayrıca bir destek masasına ihtiyaç vardır; son işlem gereklidir
SLM / Toz	Geniş yelpazede malzemeler, toz malzemenin daha az israfı ve atık tozların geri dönüştürülebilmesi	Son işlem gereklidir, toz ön ısıtması; soğuma süresi bu işlemi nispeten yavaşlatır; enerji gereksinimi yüksektir; zayıf yapısal özellikler
SLS / Toz	Katı toz geri dönüştürülebilir ve yeniden kullanılabilir. Metaller, seramikler ve kompozitler gibi farklı malzemeler kullanılabilir; çok karmaşık parçalar üretebilir	Ürünlerin yüzey kalitesi ve boyut doğruluğu zayıftır; son işlem gereklidir; yüksek güç tüketimi vardır; fiziksel birim boyutu büyüktür; bileşenlerde gözenekli yüzeyler sorunu vardır
EBM / Toz	Yüksek yoğunluklu parçalar üretilir; birden fazla parça aynı anda ve minimum sürede üretilebilir	Son işlem gereksinimi; sınırlı yapı boyutu; parçaların yüzey kalitesi zayıf; sınırlı çeşitlilikte malzemeyle çalışılabilmesi; katılaşma kusurları;
LENS / Toz	Geliştirilmiş mekanik özellikler ve mikro yapıya sahip tam yoğun ve karmaşık parçalar üretme kapasitesine sahip, son işlem gereksinimi minimumdur	Sadece metal parçalar üretir, ünitesi için geniş bir alana ihtiyaç duyar, güç tüketimi yüksektir; yüzey kalitesi zayıftır.
VAAM / Tel	Türbin kanatları, kalıplar ve kalıplardaki hasarlı parçaların veya yıpranmış parçaların onarımı için çok uygun olan üç boyutlu parçaları yazdırma yeteneği	WAAM tarafından üretilen parçaların yüzey kalitesi düşüktür; işlemin inert bir gaz odasında gerçekleşmesi gerekir; bu inert gaz, parçaların boyutunu sınırlar; yüksek sıcaklık içerir ve bu da kalıntı gerilimlerin oluşmasına neden olur ve bu da parçanın bozulmasına neden olur.
UAM / Levha	Düşük maliyet; malzeme taşıma kolaylığı; büyük parçalar kolayca üretilebilir;	Bağlı olmayan metalin çıkarılması için ek işleme gerektirir ve iç geometri oluşturur; biriktirme genellikle düz bir yüzeyde gerçekleşir; yüksek mekanik kuvvetler nedeniyle hassas özellik yapıları güvenilir bir şekilde üretilemez
LOM / Levha	Çok çeşitli malzemeleri (kağıt, metal, seramik, plastik, kompozitler) işleyebilme; daha az zamanda büyük hacimli parçaları hızla üretebilme; daha iyi doğrulukla parça üretme yeteneği; son kürleme ve destek yapılarına gerek olmaması	Hassas güç ayarı gereklidir; ince duvarların üretimi için uygun değildir; son işlem gereklidir

5. Eİ Teknolojileri ile FDM Parçalarının Üretiminde Kullanılan Malzemeler

Benzer malzemeleri birleştirirken, ister geleneksel üretim ister geleneksel Eİ yöntemleriyle olsun, mevcut birleştirme süreçleri nispeten basittir. Ancak farklı malzemeleri birleştirirken, güçlü ve uzun ömürlü bir bağ oluşturmak için birçok tasarım faktörünün dikkate alınması gerekir(Bandyopadhyay & Heer, 2018). Malzeme kalınlıkları ve birleştirme tasarımı gibi tasarım faktörlerinin yanı sıra, Isıtma ve soğutma oranının, eklemin mikro yapısı üzerindeki etkileri, Erime sıcaklığındaki farklılıklar, Birleştirme sırasında kırılgan metaller arası bileşiklerin oluşumu, kırılgan bağlantılara yol açabilmesi, üretim sırasında termal genleşme/daralma ve soğutma oranlarındaki uyumsuzluk gibi termal davranışlardaki farklılıklar ve gerçek yaşam uygulaması, parçanın bütünlüğünü sınırlamada büyük rol oynar (EWI, 2024).

FDM-Eİ'ın başarılı bir şekilde uygulanabilmesi için, malzeme seçimi, gradyan boyutları ve kullanılan belirli katkı üretim teknolojilerinin çok iyi anlaşılması gerekmektedir. Bu karmaşıklık, bileşen boyunca istenen özelliklerin elde edilmesini sağlamak için malzeme biriktirme süreci üzerinde hassas bir kontrole duyulan ihtiyaçla daha da karmaşık hale gelir. Topoloji optimizasyonu gibi gelişmiş hesaplamalı tasarım tekniklerinin entegrasyonu, yapı içindeki malzeme dağılımını optimize ederek FDM'lerin performansını ve faydasını artırmaktadır. Dahası, FDM'lerin tek bir bileşen içinde birden fazla malzemeyi birleştirme potansiyeli, inovasyon için yeni yollar açmaktadır. Bu konuda biyopolimer kompozitlerin ardışık çok malzemeli katkı maddesi ile üretimi, FDM'lerde biyolojik olarak parçalanabilir malzemelerin kullanılmasının sürdürülebilirlik yönünü öne çıkarmıştır. (Lee vd., 2020). Bu yaklaşım yalnızca çevresel endişeleri gidermekle kalmaz, aynı zamanda esneklik ve mukavemet gibi farklı malzeme özelliklerinin tek bir parçada entegre edilmesine izin vererek bileşenlerin işlevselliğini de artırır. Çok sayıda avantaja rağmen, FDM-Eİ alanında hala birkaç zorluk bulunmaktadır. FDM'lerin güvenilirliğini ve tekrarlanabilirliğini sağlamak için standartlaştırılmış süreçlere ve kalite kontrol önlemlerine duyulan ihtiyaç kritik öneme sahiptir. Bu sorunların ele alınması, havacılık ve tıbbi cihazlar gibi kritik uygulamalarda FDM'lerin yaygın olarak benimsenmesi için elzem olacaktır.

FDM'ler, hacimleri boyunca bileşim, yapı ve özelliklerde kademeli bir değişim gösteren bir malzeme sınıfıdır. Genellikle 3D baskı olarak bilinen Eİ teknolojileri, değişken malzeme bileşimlerine sahip karmaşık yapılar üretmek için benzersiz bir yetenek sağlar ve bunları FDM parçaları oluşturmak için uygun hale getirir. Eİ'de, FDM'ler için malzeme seçimi, belirli uygulama gereksinimlerine ve istenen özellik gradyanlarına bağlıdır. İşte Eİ teknolojilerinde FDM parçaları

üretmek için yaygın olarak kullanılan bazı malzemeler *şunlardır:(Alkunte et al., 2024)*

Metaller: Metaller, yüksek mekanik dayanım ve korozyon direnci sunar. Eİ ile üretilen metal FDM parçaları özellikle havacılık, otomotiv ve tıp alanlarında kullanılır.

- Titanyum Alaşımları: Hafif, yüksek mukavemet ve korozyon direncine sahip. Özellikle implantlar ve havacılık uygulamaları için ideal.
- Alüminyum Alaşımları: Hafif ve dayanıklı. Otomotiv ve havacılık sektöründe yaygın.
- Nikel Alaşımları: Yüksek sıcaklık dayanımı ile bilinir, genellikle türbin bıçakları gibi yüksek ısıl dirence sahip parçalar için kullanılır.

Seramikler: Seramik malzemeler, yüksek sıcaklık dayanımı ve aşınma direnci sunar. FDM üretiminde seramikler genellikle diğer malzemelerle kombin edilerek kullanılır.

- Alümina (Al2O3): Yüksek aşınma ve korozyon direnci sağlar.
- Zirkonya (ZrO2): İyi bir termal yalıtım sağlar ve yüksek sıcaklıklarda stabil kalır.

Polimerler: Polimerler, hafif ve esnek özellikleri ile bilinir. FDM gibi tekniklerle polimer FDM'ler üretilebilir.

- ABS (Akrilonitril Bütadien Stiren): Hafif ve dayanıklıdır, prototip üretiminde yaygın olarak kullanılır.
- PLA (Polilaktik Asit): Biyolojik olarak parçalanabilir, çevre dostu uygulamalarda tercih edilir.
- PEEK (Polieter Eter Keton): Yüksek sıcaklık ve kimyasal dayanım sunar, tıbbi implantlarda kullanılır.

Kompozit Malzemeler: Kompozit malzemeler, iki veya daha fazla malzemenin birleştirilmesiyle elde edilir ve özellikleri optimize etmek amacıyla tasarlanır. Eİ teknolojileri, kompozit malzemelerle FDM parçaları üretmede oldukça etkilidir.

- Fiber Takviyeli Polimerler: Karbon veya cam fiberlerle takviye edilmiş polimerler, hafif ama güçlü parçalar üretmek için kullanılır.

- Seramik-Metal Kompozitler (Cermetler): Seramiklerin yüksek sıcaklık dayanımını ve metallerin mekanik mukavemetini birleştirir.

7. Sonuç

Bu çalışmanın amacı, okuyuculara FDM'lerin mevcut durumu ve FDM'lerin sürekli gelişen Eİ'e getirdiği muazzam potansiyel hakkında kapsamlı bir görüş sağlamaktır. Çalışmada kavramsal bir anlayış içinde FDM ve FDM-Eİ'nin tasarımdan üretime kadar olan süreci sunulmuştur. FDM-Eİ teknolojileri, tasarımcılar ve mühendisler için maddelerin yoğunluğunu ve malzemelerin karışımını stratejik olarak kontrol ederek değişken özellikli yapılar üretmek için büyük bir potansiyel sunar. Bu teknoloji olgunlaştıkça ve uygulamalar arttıkça, çevresel ve ekonomik farkındalığın arttığı bir dünyada, birçok işletme üretimlerinin bir kısmını Eİ'ye geçirecektir. FDM-Eİ 'nin gelecekteki üretim için potansiyeli sınırsız olsada, en iyi FDM-Eİ uygulamaları için kapsamlı "malzeme-ürün-üretim" ilkeleri, kılavuzları ve standartlarının eksikliğiyle sınırlıyız. FDM-Eİ 'nin FGAM'ın ticari veya ekonomik ölçekte gerçek potansiyelini tam olarak etkinleştirmek ve kullanmak için uygun metodolojiler henüz oluşturulamamıştır(Loh et al., 2018).

Ancak Eİ bileşenleri hala yüksek iç ve dış kusurlara ve toleranslar üzerinde zayıf kontrole eğilimlidir. Sınırlı düzenleme ve operasyonel değişkenlere ilişkin zayıf anlayış nedeniyle, parça kalitesi ve yüzey bitirme standardı partiler veya makine tipleri arasında büyük ölçüde değişebilir(Tofail et al., 2018). Karmaşık iç yapılara ve mikro yapı düzeyinde bileşen fazların hassas dağılımına sahip FDM-Eİ parçalarının imalatı, FDM-Eİ için katmanlar arasında malzeme değişiminin teslimat hızının, doğruluğunun ve etkinliğinin iyileştirilmesi gerektiği anlamına gelir(Vaezi, Chianrabutra, Mellor, & Yang, 2013). Ticari olarak mevcut Eİ teknolojileri hala ağırlıklı olarak izotropik malzemeler üzerinde çalışmakta, temel bir geometrik tanıma odaklanmakta ve tüm bileşeni oluşturmak için tek malzemeler atamaktadır. Malzeme karakterizasyonu, yüksek düzeyde yerinde ölçüm gerektiren FDM-Eİ süreçleri için en önemli zorluktur. Değişken özellik gradyan baskı yaklaşımını göstermek için yerleşik bir modelleme çerçevesi olmasına rağmen, özellikle yapı boyunca bileşen fazlar ve geçiş özelliklerine sahip malzemelerin dağıtımı ile ilgili olarak daha güvenilir ve öngörülebilir bir sonucu garanti edebilecek prosedürlere ve protokollere bakma ihtiyacı devam etmektedir. Ayrıca, FDM-Eİ'yi ekonomik bir şekilde desteklemek için malzeme seçimleri, platform yapısı ve üretim hızı hakkındaki hususlar dikkate alınmalıdır(Lim et al., 2012).

Sonuç olarak, işlevsel olarak derecelendirilmiş malzemelerin eklemeli üretimi, malzeme tasarımı ve imalatına dönüştürücü bir yaklaşımı temsil eder. FDM-

Eİ, özel özelliklere sahip bileşenlerin oluşturulmasını sağlayarak havacılıktan sağlık hizmetlerine kadar çeşitli endüstrilerde devrim yaratma potansiyeline sahiptir. Bu alanda devam eden araştırma ve geliştirme, mevcut zorlukların üstesinden gelmek ve gelişmiş mühendislik uygulamalarında FDM'lerin tüm potansiyelini açığa çıkarmak için çok önemli olacaktır. Gelecekte, FDM-Eİ sistemleri yeni ve geliştirilmiş malzemeleri birleştirme ve üretme yetenekleriyle daha fazla tanınırlık kazandıkça, bu teknolojinin günlük ürünlere de girmesi muhtemeldir.

Kaynaklar

Alkunte, S., Fidan, I., Naikwadi, V., Gudavasov, S., Ali, M. A., Mahmudov, M., . . . Cheepu, M. (2024). Advancements and Challenges in Additively Manufactured Functionally Graded Materials: A Comprehensive Review. *Journal of Manufacturing and Materials Processing, 8*(1), 23.

Aydin, M., Apalak, M., Gunes, R., & Reddy, J. (2014). An experimental study on ballistics performance: functionally graded sandwich plate impacted by a 9 mm parabellum projectile. *Blucher Mat Sci Proc, 1*(1), 1-4.

Bandyopadhyay, A., & Heer, B. (2018). Additive manufacturing of multi-material structures. *Materials Science and Engineering: R: Reports, 129*, 1-16.

Cho, S. Y., Ho, D. H., Jo, S. B., & Cho, J. H. (2024). Direct 4D printing of functionally graded hydrogel networks for biodegradable, untethered, and multimorphic soft robots. *International Journal of Extreme Manufacturing, 6*(2), 025002.

El-Galy, I. M., Saleh, B. I., & Ahmed, M. H. (2019). Functionally graded materials classifications and development trends from industrial point of view. *SN Applied Sciences, 1*, 1-23.

EWI, D. M. J. (2024). Dissimilar Materials Joining Retrieved from https://ewi.org/dissimilar-materials-joining/

Ghanavati, R., & Naffakh-Moosavy, H. (2021). Additive manufacturing of functionally graded metallic materials: A review of experimental and numerical studies. *Journal of Materials Research and Technology, 13*, 1628-1664.

Gupta, A., & Talha, M. (2015). Recent development in modeling and analysis of functionally graded materials and structures. *Progress in Aerospace Sciences, 79*, 1-14.

Hardacre, D. G., & Pei, E. (2023). Standards for Additive Manufacturing. In *Springer Handbook of Additive Manufacturing* (pp. 145-161): Springer.

Kumar, P., Sharma, S. K., & Singh, R. K. R. (2023). Recent trends and future outlooks in manufacturing methods and applications of FGM: a comprehensive review. *Materials and Manufacturing Processes, 38*(9), 1033-1067.

Leu, M. C., Deuser, B. K., Tang, L., Landers, R. G., Hilmas, G. E., & Watts, J. L. (2012). Freeze-form extrusion fabrication of functionally graded materials. *CIRP annals, 61*(1), 223-226.

Lim, S., Buswell, R. A., Le, T. T., Austin, S. A., Gibb, A. G., & Thorpe, T. (2012). Developments in construction-scale additive manufacturing processes. *Automation in construction, 21*, 262-268.

Liu, Z., Meyers, M. A., Zhang, Z., & Ritchie, R. O. (2017). Functional gradients and heterogeneities in biological materials: Design principles, functions, and bioinspired applications. *Progress in Materials Science, 88*, 467-498.

Loh, G. H., Pei, E., Harrison, D., & Monzón, M. D. (2018). An overview of functionally graded additive manufacturing. *Additive Manufacturing, 23*, 34-44.

Mahamood, R. M., Akinlabi, E. T., Mahamood, R. M., & Akinlabi, E. T. (2017). Additive manufacturing of funtionally graded materials. *Functionally graded materials*, 47-68.

Naebe, M., & Shirvanimoghaddam, K. (2016). Functionally graded materials: A review of fabrication and properties. *Applied materials today, 5*, 223-245.

Nohut, S., & Schwentenwein, M. (2022). Vat photopolymerization additive manufacturing of functionally graded materials: A review. *Journal of Manufacturing and Materials Processing, 6*(1), 17.

Parihar, R. S., Setti, S. G., & Sahu, R. K. (2018). Recent advances in the manufacturing processes of functionally graded materials: a review. *Science and Engineering of Composite Materials, 25*(2), 309-336. doi:doi:10.1515/secm-2015-0395

Saleh, B., Jiang, J., Fathi, R., Al-Hababi, T., Xu, Q., Wang, L., . . . Ma, A. (2020). 30 Years of functionally graded materials: An overview of manufacturing methods, Applications and Future Challenges. *Composites Part B: Engineering, 201*, 108376.

Sarathchandra, D., Subbu, S. K., & Venkaiah, N. (2018). Functionally graded materials and processing techniques: An art of review. *Materials Today: Proceedings, 5*(10), 21328-21334.

Teacher, M., & Velu, R. (2024). Additive manufacturing of functionally graded materials: A comprehensive review. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 25*(1), 165-197.

Tofail, S. A., Koumoulos, E. P., Bandyopadhyay, A., Bose, S., O'Donoghue, L., & Charitidis, C. (2018). Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities. *Materials today, 21*(1), 22-37.

Vaezi, M., Chianrabutra, S., Mellor, B., & Yang, S. (2013). Multiple material additive manufacturing–Part 1: a review. Virtual Phys. Prototyp. 8, 19–50. In.

WU, S., WU, Z., KANG, G., CHEN, W., LI, J., KE, L., . . . HU, C. (2021). Research progress on multi-dimensional and multi-scale high-throughput characterization for advanced materials. *Journal of Mechanical Engineering, 57*(16), 37-65.

Xue, C., ZHANG, S., ZHANG, C.-h., WU, C.-l., Qiang, W., & DONG, S.-y. (2020). Research status and prospect of laser additive manufacturing technology for high performance gradient functional materials. *Journal of Materials Engineering, 48*(9), 13-23.

Zhang, R., Jiang, F., Xue, L., & Yu, J. (2022). Review of Additive Manufacturing Techniques for Large-Scale Metal Functionally Graded Materials. *Crystals, 12*(6), 858. Retrieved from https://www.mdpi.com/2073-4352/12/6/858

BÖLÜM 17

Otobüs Yolcu Koltuklarının Güvenliği İçin Yapısal İyileştirme Süreci: R80 Dinamik Testi ve Sonuçları

Buse Kaya[1] & Metin Öz[2]

[1] Endüstriyel Tasarım Mühendisi, Karsan Otomotiv, ARGE, Trim Tasarım Mühendisi
ORCID: 0009-0005-7745-9500
[2] Makine Mühendisi, Karsan Otomotiv, ARGE, Trim Tasarım Mühendisi
ORCID: 0009-0000-2640-1345

1. GİRİŞ

Toplu taşıma araçları, günlük yaşamın vazgeçilmez bir parçasıdır ve milyonlarca insanı güvenli bir şekilde taşıma sorumluluğunu üstlenir. Güvenlik, toplu taşıma araçlarının tasarımında ve üretiminde temel bir gereklilik olarak kabul edilir. Yolcuların güvenli bir şekilde taşınabilmesi için koltuklardan kapılara, güvenlik donanımlarından acil durum kaçış sistemlerine kadar tüm unsurların belirli standartlara uygun olması gerekmektedir. Özellikle kaza anında yolcu güvenliğini koruyabilmek adına çeşitli güvenlik kriterleri belirlenmiştir. Çarpışma anında meydana gelen kuvvetlerin yolcular üzerindeki etkisini en aza indirmek için, ulusal ve uluslararası standartlar doğrultusunda güvenlik gereklilikleri tanımlanmıştır.

Toplu taşıma araçlarında güvenlik gereksinimleri, yolcuların ve sürücülerin olası kazalardan en az zararla çıkabilmesi için özenle oluşturulmuştur. Bu gereksinimler, araç üreticileri için yasal zorunlulukların yanı sıra, güvenliğe yönelik bir rehber niteliğindedir. Koltuklar, bağlantı elemanları, cam yapıları, kapı ve çıkış sistemleri gibi birçok parça bu gereksinimlerin bir parçası olarak düşünülmektedir. Koltuk bağlantı elemanlarının çarpışma sırasında dayanıklı olması ve yolcuların darbe anında ciddi yaralanmalar yaşamaması en önemli hedeflerden biridir. Bu hedef doğrultusunda güvenlik gereklilikleri, farklı test ve değerlendirme süreçleri ile sağlanmakta, her bir aracın yolculara en yüksek güvenliği sunması için detaylı bir şekilde kontrol edilmektedir.

ECE R80 standardı, özellikle toplu taşıma araçlarında kullanılan koltuk sistemlerinin güvenliğini sağlamak amacıyla geliştirilmiş bir regülasyondur. Bu standart, araçların çarpışma testleri sırasında koltukların ve bağlantı elemanlarının performansını değerlendirir. ECE R80, yolcuların güvenliğini sağlamak ve kaza anında olası yaralanmaları en aza indirmek için belirli kurallar ve test gereksinimleri sunar. Standart, koltukların belirli çarpışma koşullarında nasıl bir dayanıklılık göstermesi gerektiğini detaylandırarak üreticilere net bir çerçeve sunar.

ECE R80'in kapsamı, sadece koltukların dayanıklılığı ile sınırlı değildir; aynı zamanda koltukların bağlantı noktalarının aracın yapısına nasıl monte edilmesi gerektiğini de içerir. Çarpışma anında yolcuların vücutlarının nasıl hareket edeceği, koltuğun dayanıklılığına bağlıdır ve ECE R80 bu noktada kapsamlı ölçüm kriterleri sunar. Bu standart, özellikle Avrupa'da yaygın olarak kullanılmakta olup, toplu taşıma araçlarının üretiminde uyulması zorunlu bir regülasyon olarak kabul edilir. Bu gereklilikler sayesinde toplu taşıma araçlarında güvenlik standartları yükseltilmiş ve yolcu güvenliği en üst seviyeye taşınmıştır.

ECE R80 standardı, yalnızca çarpışma testlerini değil, koltuk tasarımını, montaj yöntemlerini ve kullanılan malzemelerin dayanıklılığını da içerir. Bu nedenle, standart; üretim sürecinden montaja kadar tüm aşamalarda güvenliği ön planda tutan bir rehber niteliğindedir. Yolcu güvenliği, özellikle çarpışma anlarında en yüksek önem arz eder ve ECE R80, koltuk sistemlerinin güvenliğini sağlamak adına kritik bir rol üstlenmektedir. Koltukların, bağlantı elemanlarının ve montaj tekniklerinin bu standarda uygunluğu, yolcu güvenliğini doğrudan etkileyen temel unsurlardır.

Bu makale, toplu taşıma araçlarının güvenlik gereklilikleri çerçevesinde ECE R80 standardının önemini ve uygulanma sürecini detaylandırmayı amaçlamaktadır. Toplu taşıma araçlarının güvenliğinin nasıl sağlandığını anlamak için, özellikle koltuk sistemlerine yönelik testlerin nasıl gerçekleştirildiği ve hangi kriterlerin göz önünde bulundurulduğu detaylandırılacaktır.Süreç boyunca yapılan tasarım iyileştirmeleri, testlerin başarıyla tamamlanması ve araç içi güvenlik standartlarını artırma hedefleri detaylandırılacaktır. Koltukların ani fren ya da çarpışma anında sergilediği performans, yolcu güvenliği üzerindeki etkisiyle birlikte derinlemesine incelenecek ve elde edilen sonuçlar gelecekteki güvenlik standartlarının belirlenmesine yönelik önemli bir kaynak sağlayacaktır.

2. LİTERATÜR BİLGİSİ

Taşıt araçlarında yolcu güvenliği, koltuk sistemlerinin performansına doğrudan bağlıdır. Çarpışma anında koltukların sağladığı koruma, yolcunun hayatta kalma şansını belirler. Bu çalışmada, otomotiv sektöründe sıklıkla kullanılan R14 ve R80 koltuk testleri üzerine yapılan çalışmaların literatürü incelenecektir. R14 testi, koltukların temel güvenlik gereksinimlerini karşılayıp karşılamadığını değerlendirirken, R80 testi daha zorlu koşullarda koltukların dayanıklılığını ölçer. Literatür taraması sonucunda, R14 testi üzerine geniş bir çalışma havuzuna ulaşılmış olsa da, R80 testi üzerine yapılan çalışmaların sayısı sınırlıdır.

Arslan ve ark. (2010) çalışmalarında, araç koltuk bağlantılarının geliştirilmesine odaklanarak orta sıra üçlü yolcu koltukları, arka sıra dörtlü yolcu koltukları ve şoför koltuğunun farklı tasarım gereksinimlerini incelemişlerdir. Bu çalışmada, koltukların çarpışma anında oluşan kuvvetleri güvenli bir şekilde araç gövdesine iletmesi amaçlanmıştır. Orta sıra koltuklar, koltuk ayakları aracılığıyla gövdeye bağlanırken, arka sıra koltuklar uzay kafes yapısı ile desteklenmiştir. Her iki koltuk tipinde de emniyet kemerleri doğrudan koltuğa bağlı olup, oluşan kuvvetler bağlantı sistemleri aracılığıyla araç gövdesine dağılmaktadır.

Orta sıra üçlü koltuklar için gerçekleştirilen analiz çalışmaları sonucunda, kuvvetlerin etkili iletimini sağlayacak şekilde gövde bağlantı profilleri tasarlanmış, bağlantı civataları için mukavemet hesaplamaları yapılmış ve profil kalınlıkları optimize edilmiştir. Arka sıra dörtlü koltuklar ise gövdeye uzay kafes sistemiyle bağlanmış olup, emniyet kemerlerinin doğrudan koltuk üzerine monte edilmesiyle kuvvetlerin bu yapı aracılığıyla gövdeye aktarılması sağlanmıştır. Tüm bağlantı noktaları, yolcu güvenliğini artırmak amacıyla kapsamlı mühendislik analizleri sonucunda optimize edilerek geliştirilmiştir.

Güzelsoy (2011) Avrupa birliği uyum yasaları çerçevesinde Türkiye'de geçerli olan güvenlik mevzuatını sağlayabilecek bağlantı tasarımı gerçekleştirmiştir. Koltuk bağlantı dayanımını artırmaya yönelik yaptığı çalışmada 25 km/sa çarpma etkisine kadar dayanabilen koltuk bağlantı yapısını yeni tasarımı ile 40 km/sa çarpma etkisi dayanımına yükseltilmiştir. Yapılan tasarım önce bilgisayarlı analiz yöntemleri ile sonra gerçekleştirilen ön çarpma ve çekme testleri ile doğrulanmıştır.

Li ve ark. (2013) çalışmasında okul otobüsü güvenliği için uygulanan çeşitli düzenlemeler ve test prosedürlerini inceleyerek, özellikle farklı kısıtlama sistemlerinin (bölme sistemi, bel kemeri, bel/omuz kemeri gibi) çocuk yolcular üzerindeki koruyucu etkisini değerlendirmiştir. Bu bağlamda, ABD'deki FMVSS, Çin'deki GB24406 ve Avrupa'daki ECE R80 gibi okul otobüsü güvenlik standartlarının etkilerini ele almıştır. Dinamik R80 testleriyle, otobüs kazalarında koltuk kısıtlama sistemlerinin baş, göğüs ve uyluk yaralanmalarına karşı koruyucu kapasitesini karşılaştırmıştır. Özellikle, mevcut düzenlemelerde kapsamlı bir boyun yaralanması değerlendirmesinin yer almaması nedeniyle, bu çalışmada GB24406 ve ECE R80'e göre yapılan testlerle boyun yaralanması riskleri üzerinde durmuştur.

Öztürk ve ark. (2012) araştırmalarında araç yolcu koltuklarındaki bağlantı elemanı olan ayakların hafifletilmesi ve dayanıklılık açısından optimize edilmesini incelemiştir. Yapılan testte koltuk 3 nokta M3 sınıfı emniyet kemer çekme testine tabi tutulmuştur. koltuğa simülasyondaki gibi, alt çekme bloğundan 5490 N ve üst bloktan 4500 N'luk kuvvetler verilmiştir. Test sonucunda koltuk ve bağlantı elemanı ayakları başarıyla dayanıklılık testini geçmiştir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Otomotiv sektöründe, araç güvenliği hem üreticiler hem de tüketiciler için en öncelikli konulardan biridir. Araçların yola çıkmadan önce belirli güvenlik standartlarına uygunluğunun sağlanması, sürücü ve yolcuların can güvenliği açısından kritik önem taşır. Bu standartlara uygunluğu belgeleyen "homologasyon",

araçların güvenlik, çevresel etkiler ve teknik özellikler gibi birçok konuda belirlenen kriterleri karşıladığını gösterir.

Homologasyon süreçleri, farklı ülkeler ve bölgelerde çeşitli kuruluşlar tarafından düzenlenir. Avrupa Birliği ülkelerinde, Avrupa Ekonomik Komisyonu (ECE) tarafından belirlenen regülasyonlar geçerlidir. Bu regülasyonlar, araçların üretimden satışa kadar tüm süreçlerde uyması gereken teknik şartları ve test prosedürlerini kapsar.

Toplu taşımanın vazgeçilmez araçları olan otobüsler, yolcu güvenliği açısından özel bir öneme sahiptir. Özellikle otobüslerde kullanılan koltuklar, çarpışma veya ani duruş gibi durumlarda yolcuları korumak için kritik bir rol oynar. Bu nedenle, otobüs koltuklarının güvenlik standartlarına uygunluğu zorunludur. Avrupa Birliği ülkelerinde, otobüs koltukları için en sık uygulanan güvenlik standartlarından biri ECE R80'dir. ECE R80 standardı, koltukların statik ve dinamik yükler altındaki dayanıklılığını, bağlantı elemanlarının güvenilirliğini ve yolcuyu tutma yeteneğini test ederek, çarpışma veya ani duruş gibi acil durumlarda güvenlik sağlayacak özellikleri değerlendirir.

Bu çalışma kapsamında, ECE R80 regülasyonlarına ait testlerin, Karsan firması tarafından üretilen M2 sınıfı Atak Class II aracındaki koltuk için dinamik testi gerçekleşecek olup, tasarlanan koltuğun istenen dayanım şartlarını sağlayıp sağlamadığı araştırılacaktır. Test sonuçlarına göre iyileştirme gerektiren parça veya parçalar belirlenerek, gerekli düzenlemeler yapılacaktır. Ayrıca, ECE R80 testi için yapılan koltuğun fiziksel test sonuçları ayrıntılı olarak sunulacaktır.

3.1. Araç Tip Sınıflandırılması

M ve N tipi araç sınıflandırmaları, araçların kullanım amaçlarına ve taşıdıkları yük türlerine göre yapılan Avrupa Birliği araç sınıflandırmalarıdır. Bu sınıflandırmalar, UNECE (Birleşmiş Milletler Avrupa Ekonomik Komisyonu) ve Avrupa Birliği yönetmelikleri çerçevesinde belirlenmiştir.

M Tipi Araçlar (Yolcu Taşıyan Araçlar)

M tipi araçlar, yolcu taşımak amacıyla tasarlanmış motorlu araçlardır. Bu araçlar kendi içinde farklı kategorilere ayrılır:

M1 Kategorisi: En fazla 8 yolcu koltuğuna sahip (sürücü koltuğu hariç) yolcu taşıyan araçlardır.

M2 Kategorisi: 8'den fazla yolcu koltuğuna sahip, maksimum kütlesi 5 tonun altında olan yolcu taşıyan araçlardır.

M3 Kategorisi: 8'den fazla yolcu koltuğuna sahip, maksimum kütlesi 5 tonun üzerinde olan yolcu taşıyan araçlardır.

N Tipi Araçlar (Yük Taşıyan Araçlar)

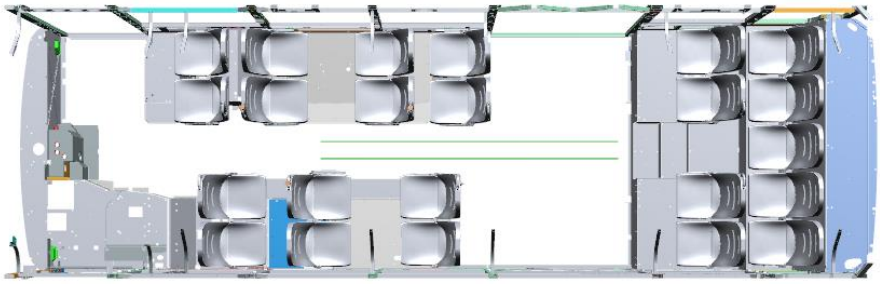
N tipi araçlar, yük taşımak amacıyla tasarlanmış motorlu araçlardır. Bu araçlar da kendi içinde farklı kategorilere ayrılır:

N1 Kategorisi: Maksimum kütlesi 3,5 tonu aşmayan yük taşıyan araçlardır.

N2 Kategorisi: Maksimum kütlesi 3,5 ton ile 12 ton arasında olan yük taşıyan araçlardır.

N3 Kategorisi: Maksimum kütlesi 12 tonun üzerinde olan yük taşıyan araçlardır.

M tipi araçlar, özellikle yolcu taşımak amacıyla tasarlandıkları için güvenlik, konfor ve dayanıklılık gibi faktörler ön plandadır. Atak Class II aracı da, M2 kategorisinde yer alan bir toplu taşıma aracı olarak şehir içi yolcu taşımacılığında kritik bir rol oynamaktadır. Yolcu güvenliğinin en üst düzeyde sağlanması gereken bu tip araçlarda, koltukların tasarımı ve özellikle koltukların araca nasıl bağlandığı büyük önem taşır.



Şekil 3.1. M2 Kategorisinde bulunan Atak Class II aracının koltuk lay-outu

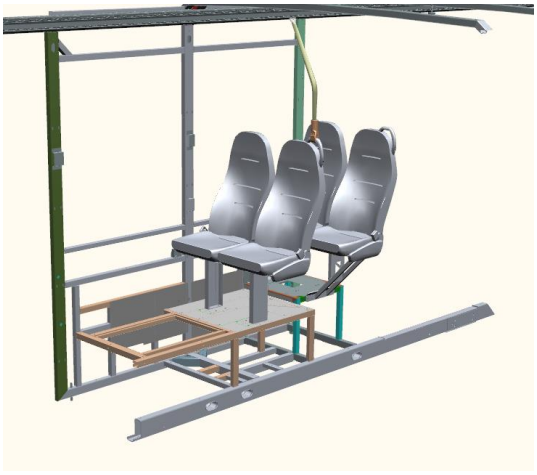
Koltuk bağlantı tasarımı, yalnızca yolcuların güvenliğini sağlamakla kalmaz, aynı zamanda araç içindeki konforu ve yolcu deneyimini de doğrudan etkiler. Atak Class II aracının koltuk bağlantı tasarımı, bu gereksinimleri karşılamak üzere özenle planlanmıştır. Bu araçlarda kullanılan koltuklar, R80 tipi onay gereksinimlerini karşılamak amacıyla belirli testlerden geçirilmiş ve bağlantı noktalarının güvenliği, dayanıklılığı ve esnekliği optimize edilmiştir.

3.2. Koltuk Bağlantı Tasarımı

Koltuk bağlantı tasarımı, toplu taşıma araçlarının güvenlik, dayanıklılık ve yolcu konforu açısından kritik bir bileşenidir. Yolcu güvenliği, bu bağlantıların aracın gövdesine sağlam ve dayanıklı bir şekilde entegre edilmesiyle doğrudan ilişkilidir. Özellikle ani fren, çarpışma gibi durumlarda koltukların yerinde kalması ve yolcuları koruyacak şekilde tasarlanması gerekmektedir.

Koltuk bağlantılarının güvenlik açısından en önemli rolü, kazalarda koltukların yerinden çıkmasını veya deformasyonunu önleyerek, yolcuların ciddi yaralanmalardan korunmasını sağlamaktır. Bu bağlamda, R80 tip onay testleri, koltukların ve bağlantı noktalarının zorlu koşullarda nasıl performans gösterdiğini değerlendirerek güvenlik standartlarına uygun olup olmadığını belirler.

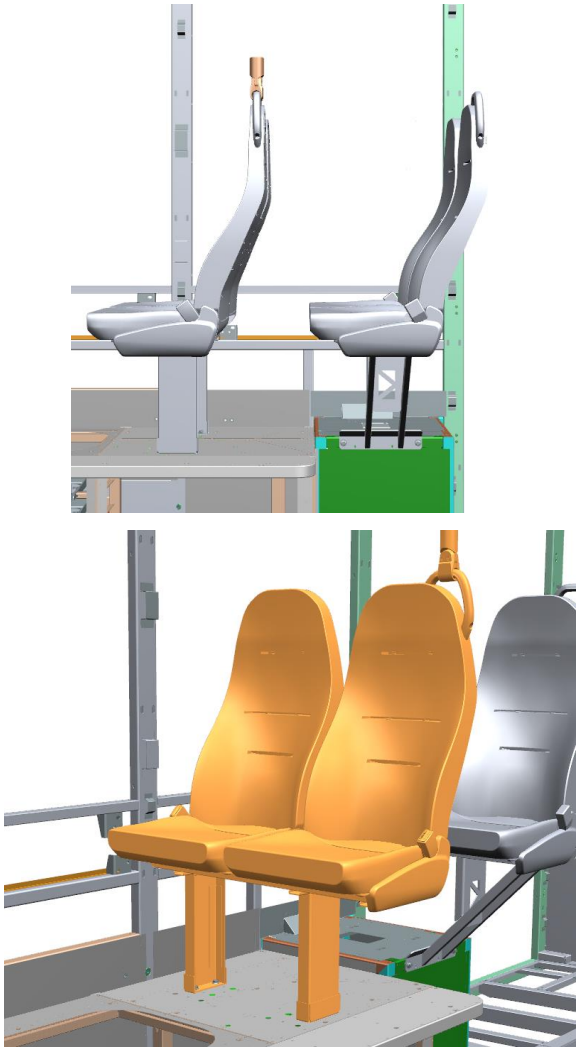
Ayrıca, toplu taşıma araçlarındaki koltuklar, yoğun kullanım nedeniyle sürekli bir yük altında çalışır. Bu nedenle, koltuk bağlantılarının uzun ömürlü olması, bakım gereksinimlerini minimize ederken aynı zamanda aracın genel dayanıklılığını artırır. İyi tasarlanmış bağlantı noktaları, koltukların araç gövdesine sıkı ve sağlam bir şekilde monte edilmesini sağlarken, titreşim ve gürültüyü de azaltarak yolcular için daha konforlu bir seyahat deneyimi sunar.



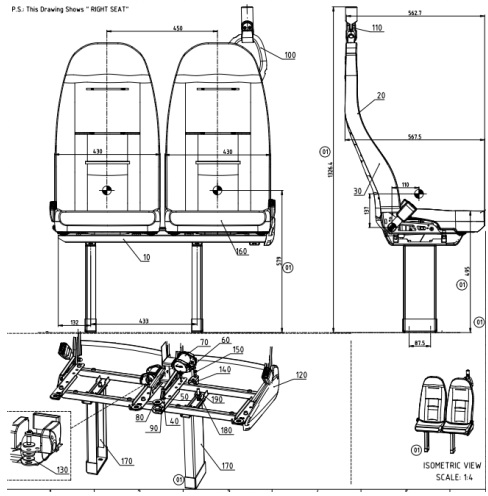
Şekil 3.2. Koltuk bağlantısı

Koltuk bağlantısı, koltuğun araç gövdesine bağlantısını oluşturan ve koltuğa etkiyecek ağırlığı taşıma görevi yapan parçalar bütünüdür. Mevcut durumda bu bağlantı levha sistemi veya boru sistemi şeklinde olabilmektedir. Boru tipi bağlantıda bağlantı dayanımı artırmak için çeşitli kafes sistemi çeşitleri kullanılabilmektedir. M1 sınıfı ticari araçlarda 8'den fazla yolcu taşıma kapasitesi bulunduğu

için koltuk ve koltuk bağlantıları iç tasarımın önemli bir bölümünü oluşturmaktadır. Bu bağlantı taban tahtasını aşarak aracın BIW bölümüne monte edilmektedir. Mühendislik bakış açısı ile koltuk yapısı; koltuk gövdesi, emniyet kemeri ve koltuk bağlantısını oluşturan kirişlerden, borulardan ve bağlantının genel özelliklerinin saptanması için birbirini etkileyen birleşimlerden oluşan bir grup olarak düşünülebilir. Bu kirişler ve borular, diğer etkenlerle beraber dayanıklılık, ve mukavemet gibi yerel özelliklerin elde edilmesi için diğer parçalarla birleştirilmiş noktalarda sık sık takviye edilmiştirler. Güzelsoy (2011)



Şekil 3.3. Atak Class II aracının koltuk bağlantı görseli



Pos.	Stck.	Benennung	Materialn. li.	Materialn. re.	Bemerkung
190	4	Schr M10x20 10.9 ISO 7380.	3008822		
180	4	Was. DIN125-ST 165-170HV M10.5	3008037		
170	2	Underfream Leg RAL 7015	100861		
160	1	IL seat short cushion Lite 430 C.		187944	
150	2	Bolt M8x16 DIN 7991 10.9	3008302		
140	2	Welded 2PG Belt Conn. Sheet	187937		
130	2	Washer A8,4 DIN 9021 ZnNi	3008041		
120	1	Cover R Mallit RAL 7015 mounted	521236z		
110	1	ø35mm Stanchion cup RAL7015	188678		
100	1	Side handle RAL7016 left mnt	194631.002		
90	4	P. Washer PA6 B. 75-80 shore	2029917		
80	4	Snapper white	2021131		
70	2	2P Seat belt compl. Interline Mnt.	519840z		
60	2	M8x25 10.9 ISO 7380 G. 321A B.	3009486		
50	6	Disc B8.4 DIN 125-ST ZnNi Silv. z.	3008735		
40	6	M8x25 DIN 912 Edit. 12.9 Geo. B.	301187		
30	1	IL seat short cushion Lite 430 C.	187943		
20	2	Interline 2PG Backrest RAL7015	188726.002		
10	1	Welded Chassis RAL7015	100507		

Şekil 3.4. Yolcu Koltuğu Teknik Resmi

3.3. ECE R80'in Gerektirdiği Güvenlik Testleri

ECE R80 Regülasyonu, Birleşmiş Milletler Avrupa Ekonomik Komisyonu (UNECE) tarafından belirlenen, otobüslerde ve diğer toplu taşıma araçlarında kullanılan koltukların ve bağlantı elemanlarının güvenlik standartlarını tanımlayan bir düzenlemedir. Bu regülasyonun temel amacı, yolcu güvenliğini artırmak ve çarpışma anında yolcuların maruz kaldığı riskleri azaltmaktır.

Koltuk üreticileri, ECE R80 Regülasyonu kapsamında tip onayı alabilmek için şu test prosedürlerinden birini seçebilirler:

- **Dinamik Testler:** Koltukların ve bağlantı elemanlarının, belirli bir hızda ve kuvvette gerçekleştirilen çarpışma simülasyonları altında test edilmesidir. Bu testler, koltukların ve bağlantı elemanlarının çarpışma anında nasıl davrandığını ve yolcuların güvenliğini ne derece koruduğunu değerlendirir.



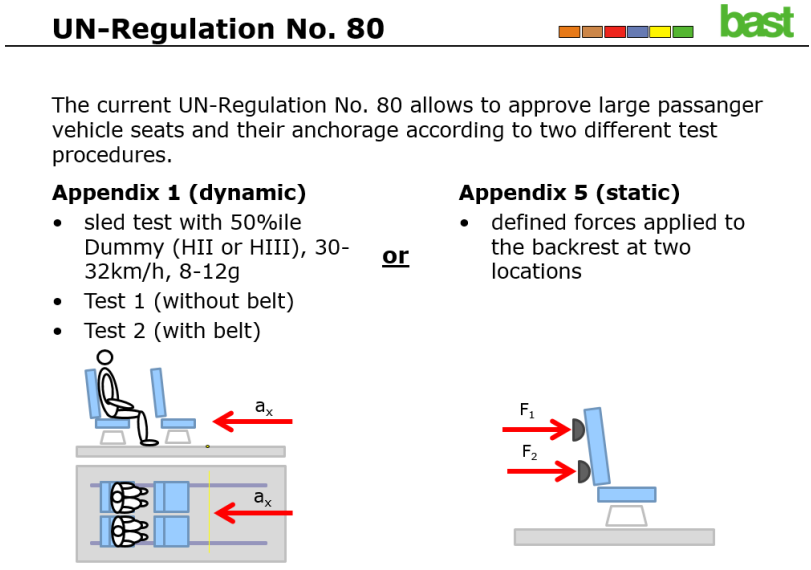
Şekil 3.5. Dinamik Test Düzeneği

- **Statik Testler:** Koltukların belirli bir süre boyunca sürekli yük altında nasıl davrandığını değerlendiren testtir. Bu testler, koltuğun uzun süreli kullanımda deformasyon, çökme veya diğer yapısal bozulmalara karşı ne kadar dayanıklı olduğunu belirlemek için kullanılır.



Şekil 3.6. Statik Test Düzeneği

ECE R80 test ve koltuk tip onayı, büyük yolcu taşıtlarında kullanılan koltukların güvenlik ve dayanıklılık standartlarını belirleyerek, yolcuların güvenliğini artırmayı amaçlar. Bu regülasyon, üreticilere standartlara uygun ürünler geliştirme ve uluslararası pazarda rekabet etme imkanı sağlar.



Şekil 3.7. Statik ve Dinamik Test Prosedürleri Arasındaki Karşılaştırmalı Çalışma

3.4. ECE R80 Test Süreci: Mock-up Simülasyonu ve Çarpışma Testleri

Test yapılacak araçta, yolcu araç gidiş yönünde oturmuş olmalı ve önündeki koltuklar da araç gidiş yönünde olmalıdır. Arkaya bakan veya yan olan koltuklara R80 testi uygulanmaz. R80 testinin yapılabilmesi için, aracın tamamının yerine, sadece teste tabi tutulacak koltukların bulunduğu alanın bir simülasyonu yapılır. Bu simülasyon, "mock-up" olarak adlandırılan, test alanını ve koşullarını gerçeğe uygun şekilde yansıtan bir modelin oluşturulmasıyla gerçekleştirilir.

Mock-up üretimi, gerçek araç koşullarını taklit ederek, koltukların ve bağlantı elemanlarının dayanıklılığını ve güvenliğini doğru bir şekilde değerlendirmeyi sağlar. Üretilen mock-up, montajı yapıldıktan sonra çok yüksek bir ivmeyle raylar üzerinde hızlandırılır ve aniden durdurulur. Bu ani durdurma etkisiyle, dummy (test mankeni) ve koltukların davranışları dikkatlice incelenir.

Dummy'lerin baş, diz gibi koltuk ile temas edebilecek bölgelerinde sensörler bulunur. Çarpmanın etkisiyle, bu sensörler yardımıyla dummy'nin ne kadar darbeye maruz kaldığı ölçülür. Elde edilen veriler, koltukların ve bağlantılarının çarpma anında nasıl davrandığını ve yolcu güvenliğini ne kadar koruduğunu belirlemeye yardımcı olur. Test sonuçlarına göre, koltukların güvenlik standartlarını karşılayıp karşılamadığı belirlenir ve test başarılı ("ok") veya başarısız ("nok") olarak değerlendirilir.



Şekil 3.8.Test düzeneği

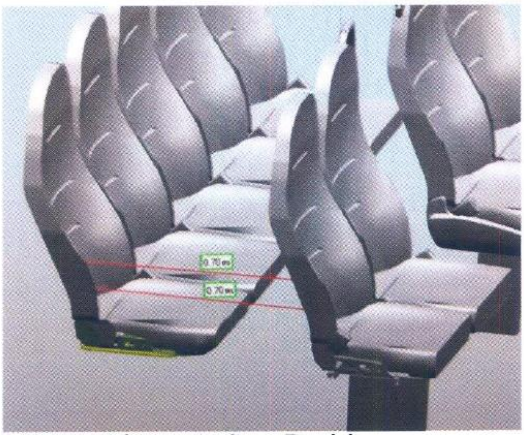
3.5. ODTÜ Biltir Test Merkezi Tarafından Belirlenen Test Yöntemi ve Prosedürü

ODTÜ-BİLTİR Merkezi, Türkiye'de taşıt güvenliği alanında öncü bir kuruluş olarak, otomotiv sektörüne yönelik kapsamlı test hizmetleri sunmaktadır. Bu merkezde gerçekleştirilen ECE R-80 standardına uygun dinamik testler ile büyük yolcu araçlarındaki koltukların ve bağlantı noktalarının dayanıklılığı değerlendirilmektedir. %50 HIII tipi bir manken kullanılarak yapılan bu testlerde, koltukların çarpışma anındaki performansı, özellikle emniyet kemeri olmaksızın, ortalama 10g'lık bir ivme altında incelenmektedir. Elde edilen sonuçlar, hem otobüs üreticilerine yeni teknolojiler geliştirmeleri için yol göstermekte hem de düzenleyici kurumların daha güvenli otobüs standartları belirlemesine yardımcı olmaktadır.

3.4.1. Test Detayları

- **Koltuk Pozisyonu:** Koltuklar, yardımcı koltuğun sırt dayanağının iç yüzeyi ile test edilen koltuğun arkası arasında 700 mm mesafe olacak şekilde konumlandırılır (Şekil 3.9)

- **Mankenler:** İkincil (yardımcı) koltuklarda 2 adet %50 HIII tipi sensörlü test mankeni kullanılır.
- **Emniyet Kemeri:** Test sırasında emniyet kemeri kullanılmaz.
- **Test Sinyal:** Test sinyali, ivme-zaman koridoruna uygun olarak uygulanır ve test hızı 30-32 km/sa olarak belirlenmiştir.

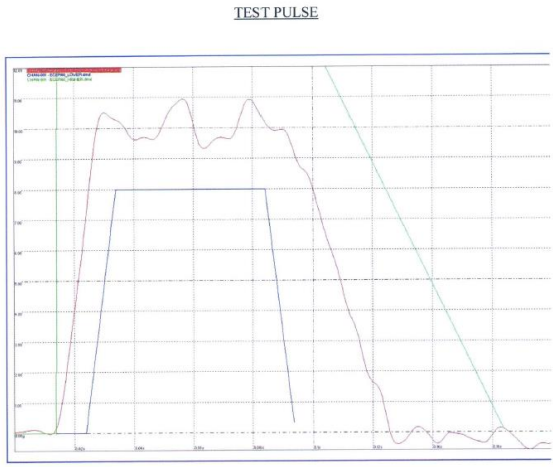


Şekil 3.9. Koltuk pozisyonları

ECE R80 testinde "test pulse," koltukların dayanıklılık ve yolcuları koruma kabiliyetini değerlendirmek için uygulanan bir hızlanma veya yavaşlama eğrisini ifade eder. Bu pulse, çarpışma veya ani duruş gibi durumları simüle eden belirli bir ivme veya kuvvet eğrisidir. Test sırasında koltuk ve bağlantı elemanları, bu pulse ile belirlenen kuvvet ve hızlanma koşullarına maruz bırakılır. Test pulse, koltukların yolcuyu güvende tutma performansını değerlendirirken tutarlı ve tekrarlanabilir bir test ortamı sağlar.

Test darbesi, yeşil çizginin üstünde bir değer alırsa, bu durum koltuğun aşırı yüklendiğini ve muhtemelen hasar gördüğünü gösterir. Bu durumda, koltuk homologasyon şartlarını karşılamaz. Eğer test darbesi, mavi çizginin altında bir değer alırsa, bu durum testin yetersiz olduğunu gösterir. Koltuk, gerçek bir çarpışma durumunda maruz kalacağı kuvvete göre yeterince test edilmemiş demektir.

Test darbesi, yeşil ve mavi çizgiler arasında kalmalıdır. Bu durumda, koltuk hem yeterli bir darbeye maruz kalmış hem de aşırı yüklenmemiş olur.



Şekil 3.10. Test darbesi

3.5.2. Test Kriterleri

Test numunesinin aşağıdaki koşulları sağlaması gerekmektedir:

- Yardımcı koltuktaki (ikincil koltuk) mankenin başının ve koltuk gövdesinin herhangi bir kısmının ileri hareketi, yardımcı koltuğun R noktasından itibaren 1.6 metreyi aşmamalıdır.
- Test mankeni, öndeki koltuk (test edilen koltuk) ve/veya emniyet kemeri tarafından uygun şekilde sabitlenmelidir.
- Koltuk, test boyunca uygulanan tüm yükler altında yerinden oynamadan sabit kalmalı ve kilitleme sistemi, koltuk bağlantı noktalarından bir veya daha fazlası kopsa bile, etkinliğini korumalıdır.
- Koltuğun, koltuk bağlantılarının veya aksesuarlarının hiçbir kısmı test sırasında tamamen ayrılmamalıdır.
- Testten sonra, koltuk veya aksesuarları kırılmış ya da herhangi bir yaralanmaya neden olabilecek keskin, sivri uçlar veya köşelere sahip olmamalıdır.
- Mankende okunan sensör değerleri aşağıdaki kabul kriterlerini karşılamalıdır.

Criteria	Explanation	Acceptance criteria
HIC	The head acceptability criterion	< 500
ThAC	The thorax acceptability criterion	< 30 g (for 3 ms)
FAC	The femur acceptability criterion	< 8 kN (for 20 ms), <10 kN

Şekil 3.11. Kabul edilebilirlik kriterleri

HIC (Head Injury Criterion): Başın çarpışma sırasında maruz kaldığı hasarın şiddetini ölçen bir kriterdir. Daha düşük bir HIC değeri, başın daha az hasar gördüğü anlamına gelir.

ThAC (Thoracic Injury Criterion): Göğüs kafesinin çarpışma sırasında maruz kaldığı hasarın şiddetini ölçen bir kriterdir. ThAC değeri, genellikle belirli bir süre (burada 3 milisaniye) içindeki ortalama ivme ile ilişkilidir.

FAC (Femur Injury Criterion): Uyluk kemiğinin çarpışma sırasında maruz kaldığı kuvveti ölçen bir kriterdir. FAC değeri, sol ve sağ bacak için ayrı ayrı belirtilir ve genellikle belirli bir süre (burada 20 milisaniye) içindeki maksimum kuvvet ile ilişkilidir.

3.6. Yolcu Koltuğu İçin Fiziksel Testin Gerçekleştirilmesi

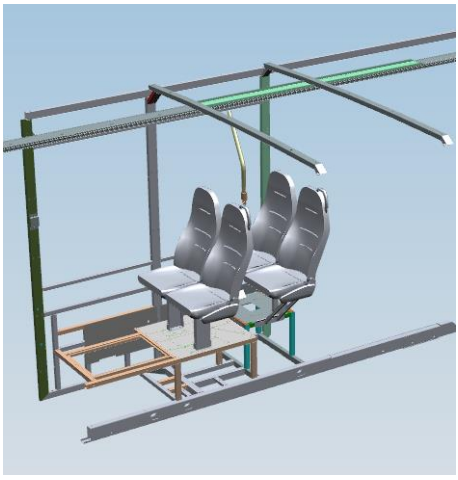
Testin yapılabilmesi için, aracın tamamı yerine teste tabi olacak koltukların bulunduğu alan simüle edilerek mock-up üretimi gerçekleştirildi.



Şekil 3.12. Atak Class II Koltuk Lay-out

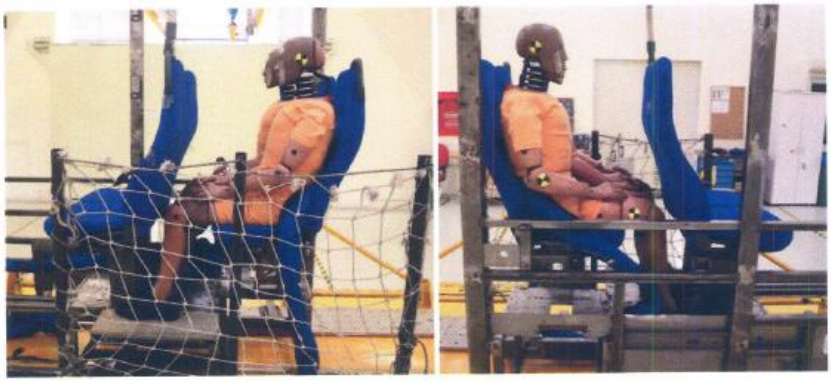
3.6.1. 1. Mock-Up Test ve Sonuçları

İlk test aşamasında 1. Mock-Up modeli kullanılmıştır. Yapılacak olan 30-32 km/h hızındaki çarpışma testinde, antropomorfik mankenler (dummy'ler), uluslararası güvenlik standartlarında belirtilen pozisyonlara ve kısıtlama sistemlerine uygun olarak titizlikle yerleştirilmiştir.



Şekil 3.13. Oluşturulan Mock-up 1

Mankenlerin oturma pozisyonu, baş ve boyun destekleri, omuz ve pelvis kısıtlamaları gibi tüm detaylar, gerçek bir sürücü veya yolcunun çarpışma anındaki pozisyonunu simüle etmek üzere hassas bir şekilde ayarlanmıştır. Bu sayede, çarpışma anında mankenlerin vücutlarına etkiyen kuvvetler ve oluşan yaralanmalar, gerçek bir insan üzerindeki etkileri daha doğru bir şekilde yansıtacaktır.



Şekil 3.14. Test öncesi yan görünüm

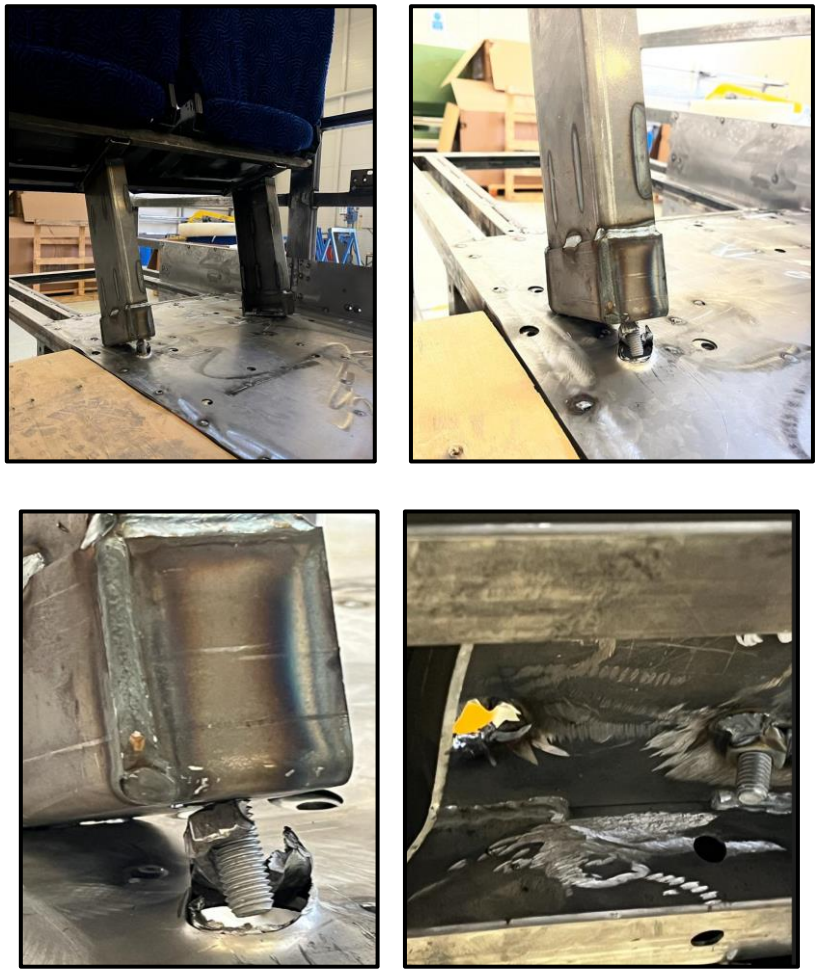


Şekil 3.15. Test öncesi koltuk detayları



Şekil 3.16. Test öncesi koltuk bağlantı detayları

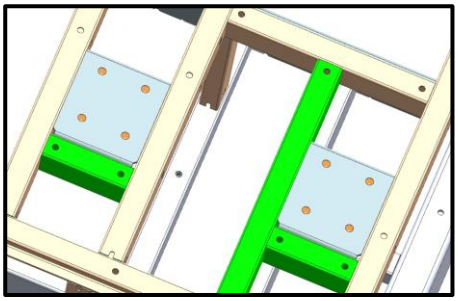
Gerçekleştirilen 30-32km/h hızındaki çarpışma testinde, belirlenen çarpışma senaryosu altında koltuk, özellikle braket ve kaynak noktalarında beklenmedik bir hasar almıştır. Test sırasında dummy'lerin çarpma etkisiyle, koltuk tabanına bağlı olan braketin kaynak noktası koparak koltuk tabanından ayrılmıştır. Bu kopma, koltuğun genel stabilitesinin kaybolmasına ve yolcu güvenliğinin ciddi şekilde tehlikeye girmesine neden olmuştur. Bu nedenle, test başarısız olarak değerlendirilmiştir.



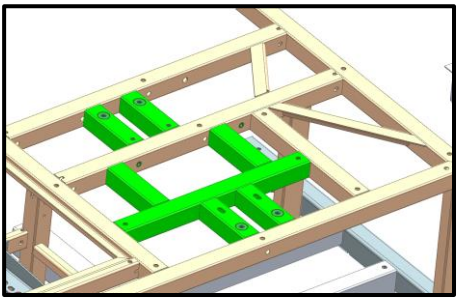
Şekil 3.17. Testte ayak bağlantılarında meydana gelen olumsuzlukların görünümü

3.6.1.1. Çarpışma Testinde Başarısızlık ve Tasarım İyileştirme Süreci: 1. Mock-Up

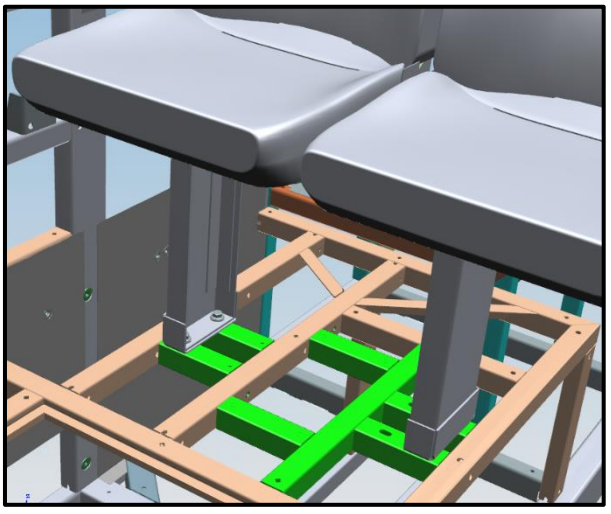
1.Mock-Up'da çalışılmış olan braket bağlantı sisteminin çarpışma testlerindeki yetersizliği üzerine, 2.Mock-Up'da daha önceden çalışılmış olan, yüksek mukavemetli çelikten üretilen kare profil kullanılarak, burçlu bir yapı ile bağlantı sağlamlaştırılarak daha güçlü bir profil bağlantı sistemi oluşturulmuştur. Bu sayede, çarpışma anında oluşan kuvvetlerin daha geniş bir alana dağılarak, koltuk yapısının genel dayanıklılığı artırılmış ve yolcu güvenliği iyileştirilmiştir.



Mevcut Tasarım



Yeni Tasarım



Şekil 3.18. Yeni tasarım koltuk bağlantısı

İlk prototipteki (Mock-Up 1) tasarım iyileştirmelerinin ardından, yeni tasarımın performansını değerlendirmek üzere yeniden test sürecine alınmıştır. Yeni kare profilli bağlantı sistemi, yalnızca koltuk yapısının çarpışma kuvvetlerine dayanıklılığını artırmakla kalmamış, aynı zamanda koltukların çarpışma anında esneklik sınırları içerisinde kalmasını da sağlamıştır. Bu tasarım değişikliği, çarpışma anında kuvvetlerin kontrollü bir şekilde dağıtılmasını mümkün kılarak, bağlantı noktalarındaki stres seviyelerini azaltmıştır. Yeniden gerçekleştirilen test sonucunda test başarılı olmuştur.

3.6.1.2. Tasarım İyileştirmesi Sonrası Test Sonucu : 1.Mock-up



Şekil 3.19. Test sonrası koltuk ayrıntıları 1



Şekil 3.20. Test sonrası koltuk ayrıntıları 2

Criteria	Explanation	Measured value	
		1070 Dummy	1071 Dummy
HIC	The head acceptability criterion	88 < 500	294 < 500
ThAC*	The thorax acceptability criterion	**17.16 g** < 30 g (for 3 ms)	**16.31 g** < 30 g (for 3 ms)
FAC**	The femur acceptability criterion	**Left:4.507 kN** < 8 kN (for 20 ms), <10 kN **Right:4.411 kN** < 8 kN (for 20 ms), <10 kN	**Left:4.312 kN** < 8 kN (for 20 ms), <10 kN **Right:4.490 kN** < 8 kN (for 20 ms), <10 kN

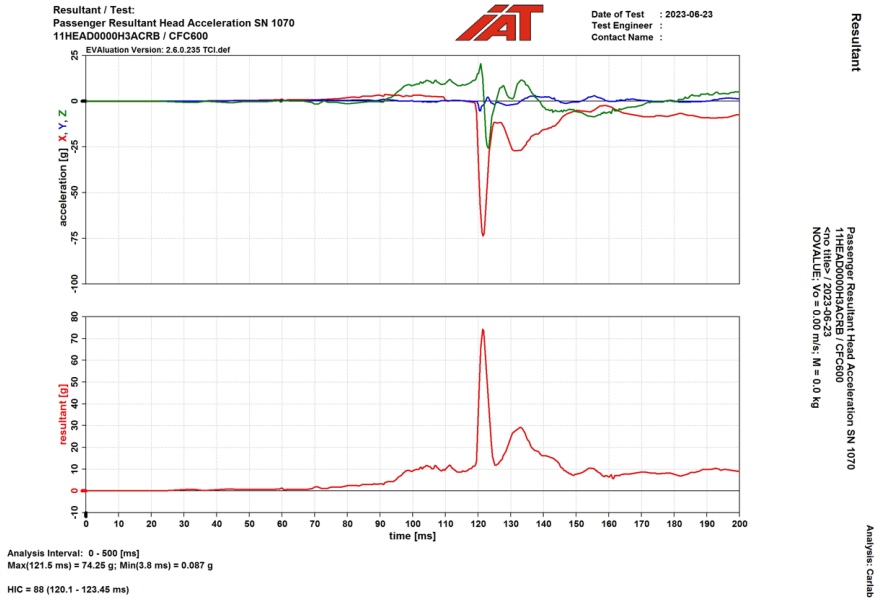
Şekil 3.21. Test kabul kriteri sonuçları

Test Sonucu : Başarılı

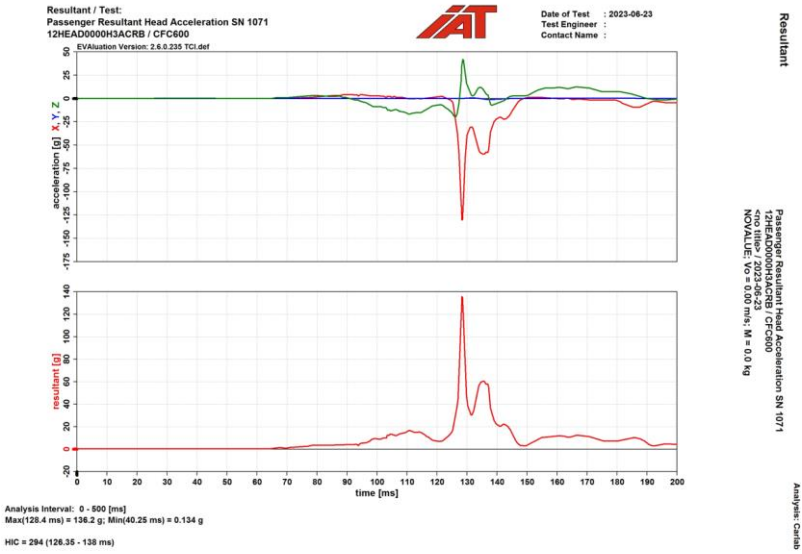
Koltuk, araç tabanından ayrılmamıştır.

Mankende okunan sensör değerleri kabul kriterini karşılamaktadır.

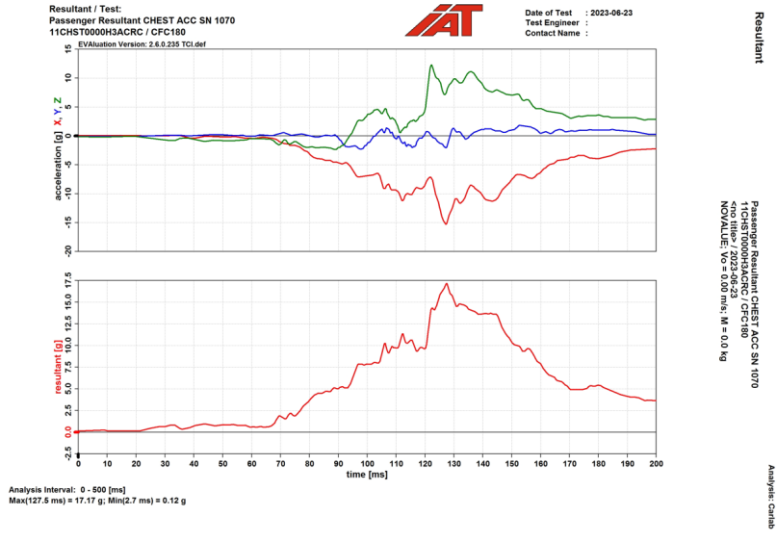
Test sonrasında koltukta kırık, keskin veya sivri uçlar bulunmamaktadır.



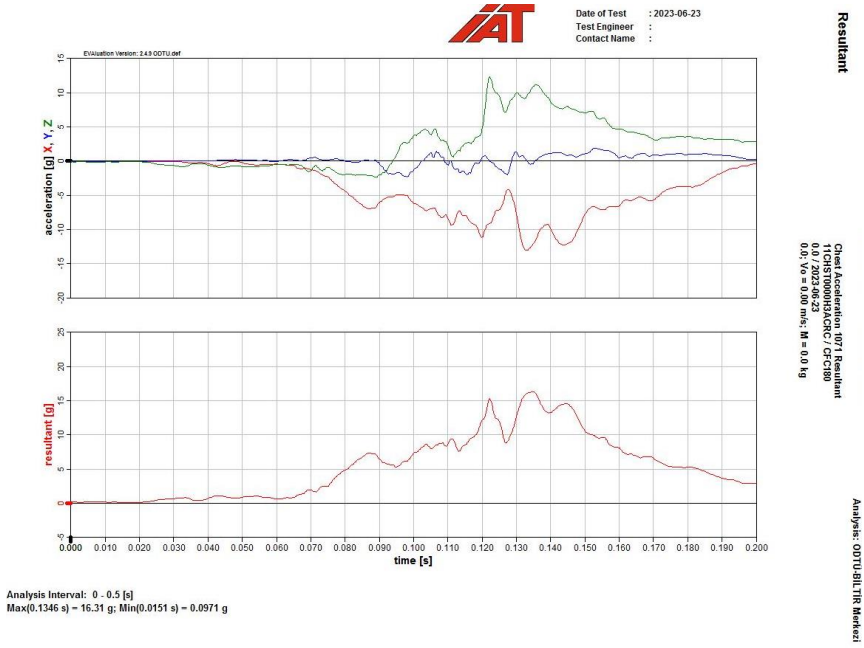
Şekil 3.22. 1070 Dummy HIC Şematiği



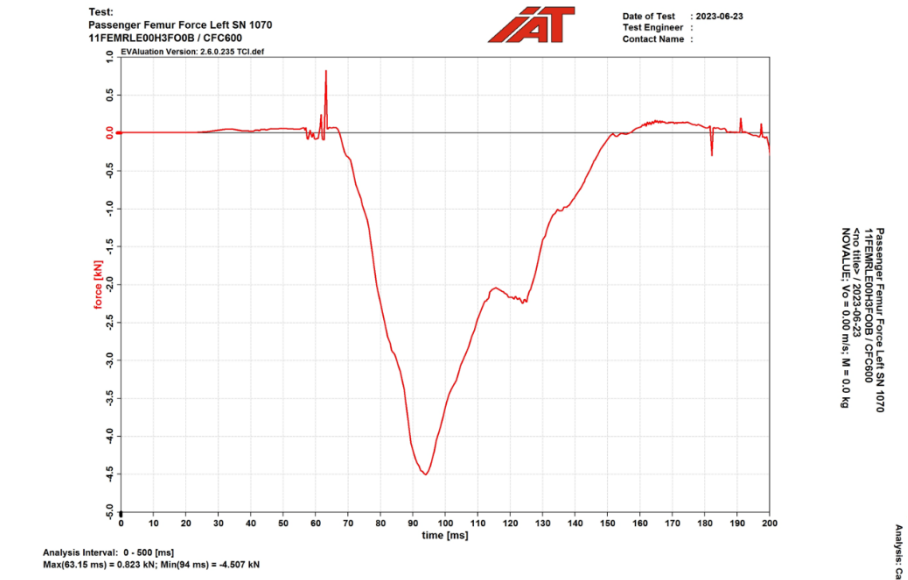
Şekil 3.23. 1071 Dummy HIC Şematiği

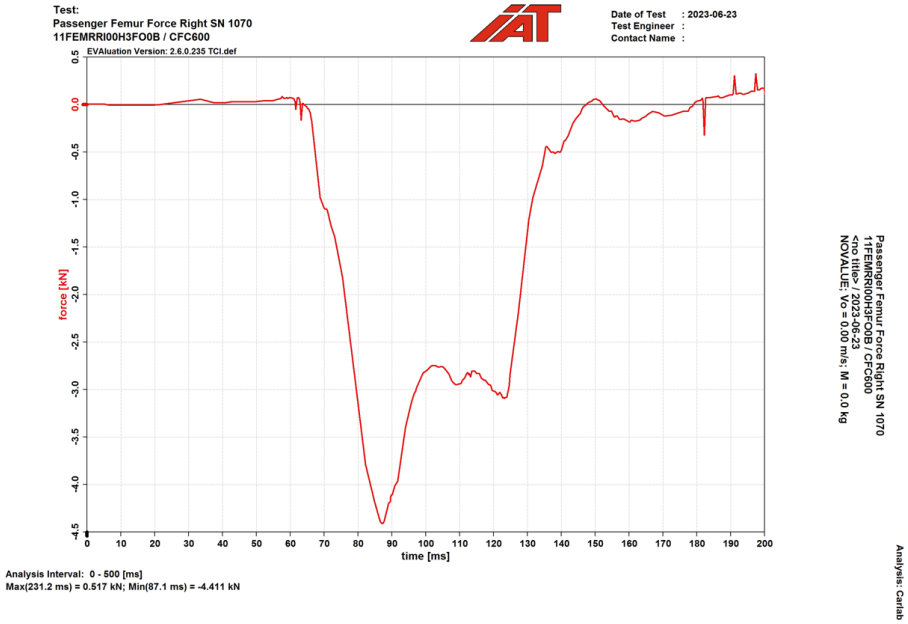


Şekil 3.24. 1070 Dummy ThAC* Şematiği

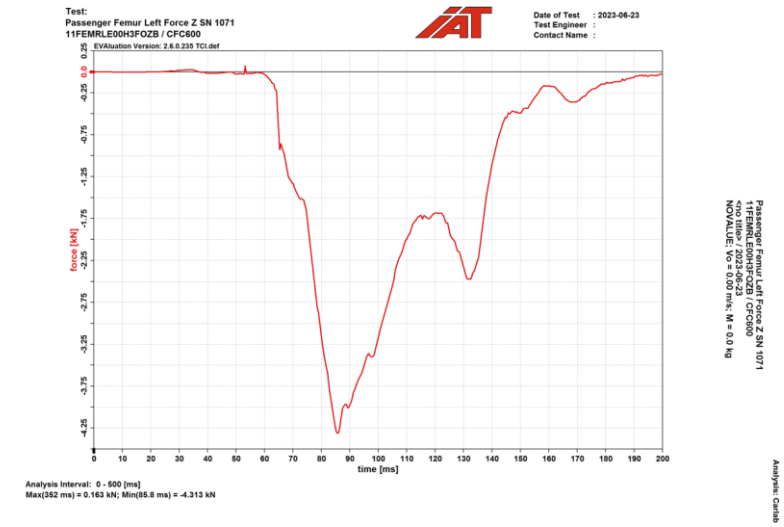


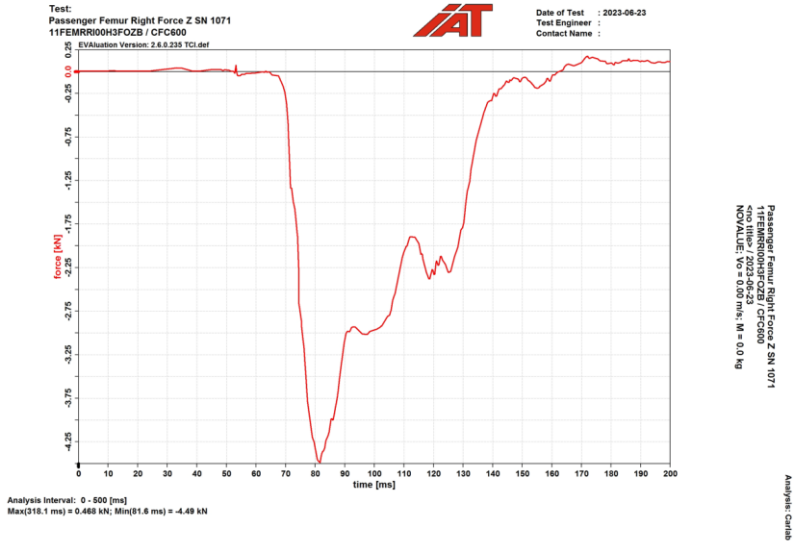
Şekil 3.25. 1071 Dummy ThAC* Şematiği





Şekil 3.26. 1070 Dummy FAC** (Sol ve Sağ) Şematiği

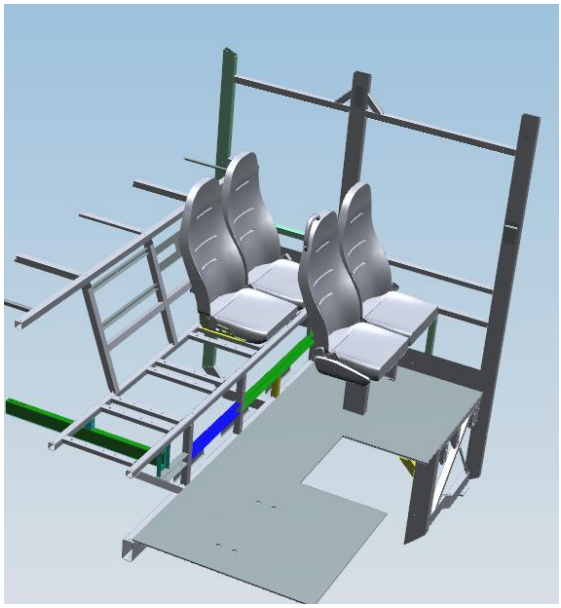




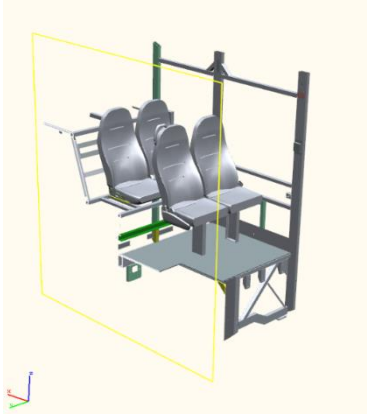
Şekil 3.27. 1071 Dummy FAC** (Sol ve Sağ) Şematiği

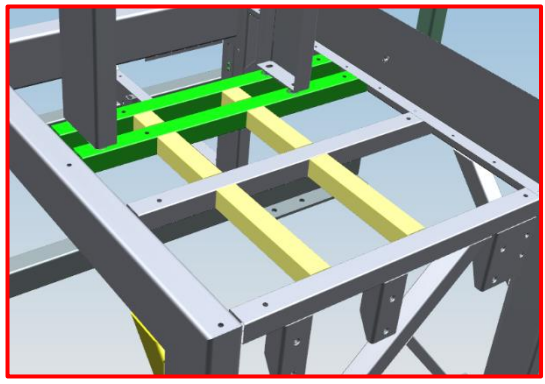
3.6.2. 2.Mock-Up Test ve Sonuçları

İkinci prototip (Mock-Up 2) için ilk kez gerçekleştirilecek olan çarpışma testi öncesinde dummyler belirtilen pozisyonlara ve kısıtlama sistemlerine uygun olarak yerleştirilmiştir.

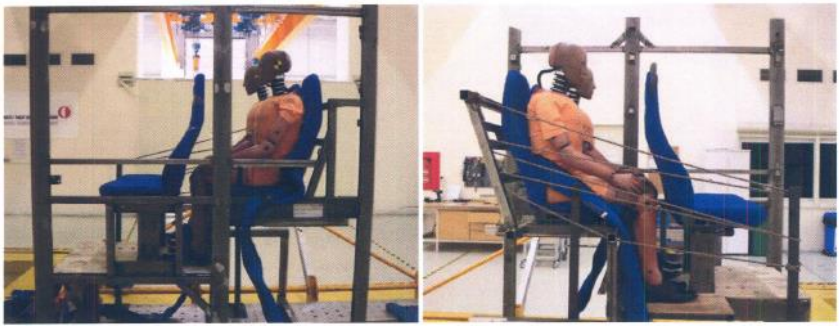


Şekil 3.28. 2.Mock-Up Düzeneği

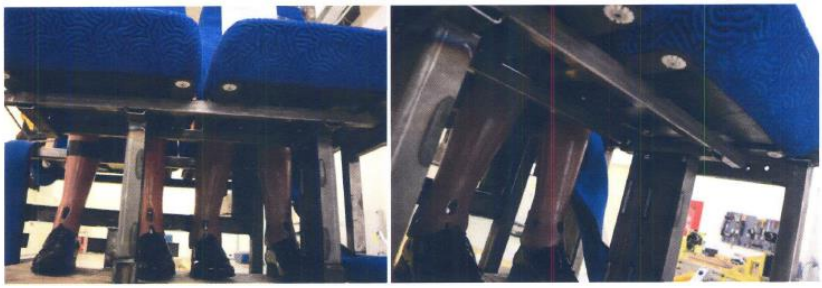




Şekil 3.29. 2.Mock-Up Koltuk Bağlantısı



Şekil 3.30. Test öncesi yan görünüm



Şekil 3.31. Test öncesi koltuk detayları



Şekil 3.32. Test öncesi koltuk bağlantı detayları

Gerçekleştirilen 30-32km/h hızındaki çarpışma test sonucunda, gövde burçları kaynaktan koparak koltuk ile beraber yerinden çıktığı için test olumsuz sonuçlandı.

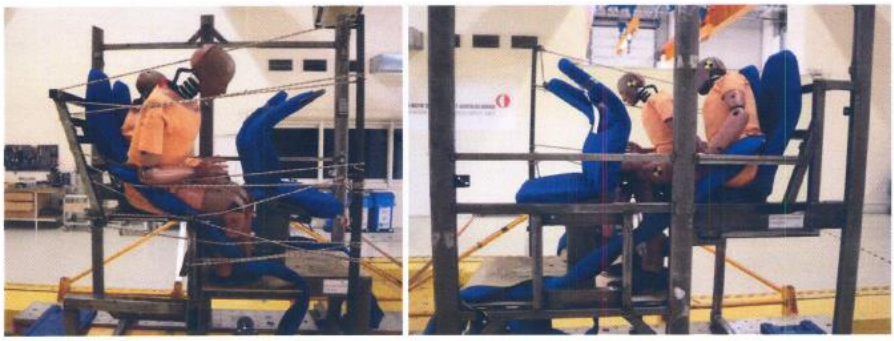


Şekil 3.33. 2.Mock-Up testinde ayak bağlantılarında meydana gelen olumsuzlukların görünümü

3.6.2.1. Çarpışma Testinde Başarısızlık ve Koltuk Bağlantılarını Güçlendirme: 2. Mock-Up

Kullanılan M10 x 10.9 kalite cıvatalar, nominal olarak 71 Nm ±%10 torkla sıkılmıştır. Ancak test sırasında, koltuk bağlantılarındaki cıvataların aşırı yüklenme sonucu koptuğu tespit edilmiştir. Detaylı incelemeler, kullanılan M10 cıvataların hem malzeme hem de boyut bakımından koltuk yükü için yetersiz kaldığını ortaya koymuştur. Bu sonuçlara dayanarak, koltuk bağlantılarında M12 x 10.9 kalite cıvatalar kullanılmasına karar verilmiş ve 121 Nm ±%10 tork değerleriyle yeni bir test süreci gerçekleştirilmiştir. M12 cıvatalarla yapılan tekrarlı testlerde, bağlantı noktalarında yapısal bütünlüğün korunduğu, koltukların esneklik sınırları içinde hareket ederek işlevlerini sorunsuz sürdürdüğü gözlemlenmiştir.

3.6.2.2. Koltuk Bağlantılarını Güçlendirme Sonrası Test Sonucu : 2.Mock-up



Şekil 3.34. Test sonrası koltuk ayrıntıları 1



Şekil 3.35. Test sonrası koltuk ayrıntıları 2



Şekil 3.36. Test sonrası koltuk ayrıntıları 3

Criteria	Explanation	Measured value	
		1070 Dummy	1071 Dummy
HIC	The head acceptability criterion	72 < 500	111 < 500
ThAC*	The thorax acceptability criterion	**18.38 g** < 30 g (for 3 ms)	**16.38 g** < 30 g (for 3 ms)
FAC**	The femur acceptability criterion	**Left:3.514 kN** < 8 kN (for 20 ms), <10 kN **Right:4.189 kN** < 8 kN (for 20 ms), <10 kN	**Left:3.104 kN** < 8 kN (for 20 ms), <10 kN **Right:3.425 kN** < 8 kN (for 20 ms), <10 kN

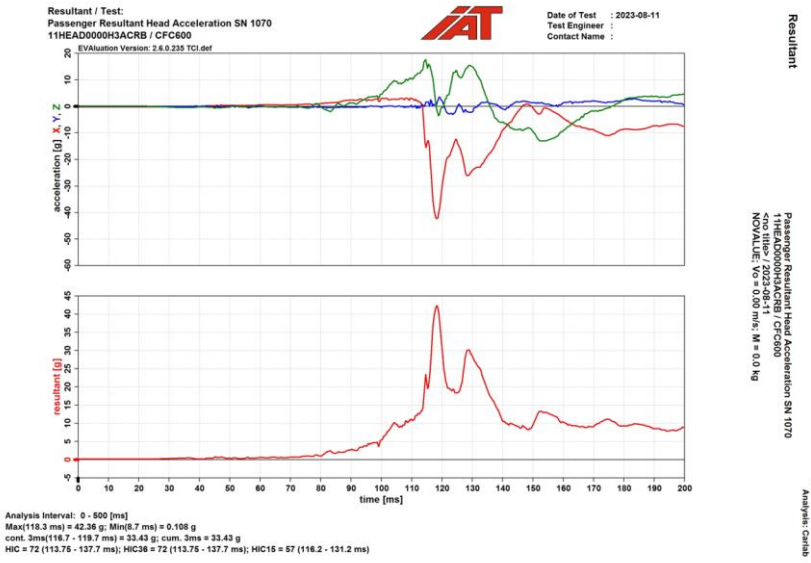
Şekil 3.37. Test kabul kriteri sonuçları

Test Sonucu : Başarılı

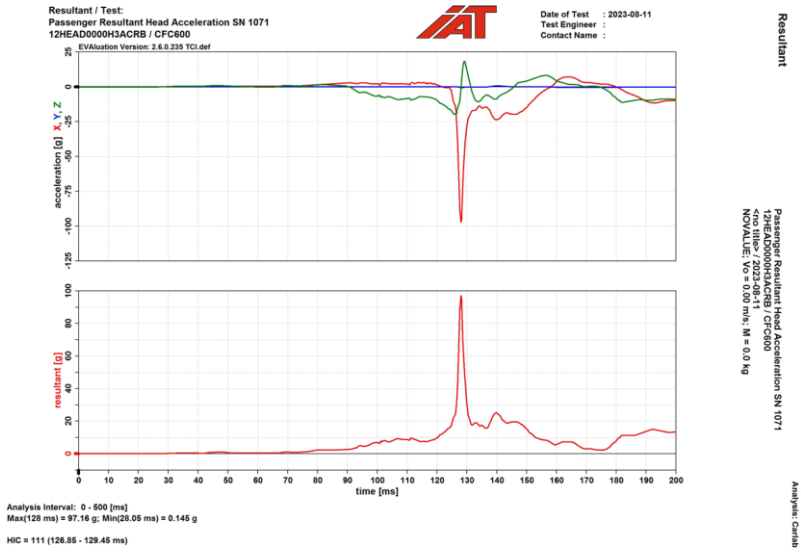
Koltuk, araç tabanından ayrılmamıştır.

Mankende okunan sensör değerleri kabul kriteri karşılamaktadır.

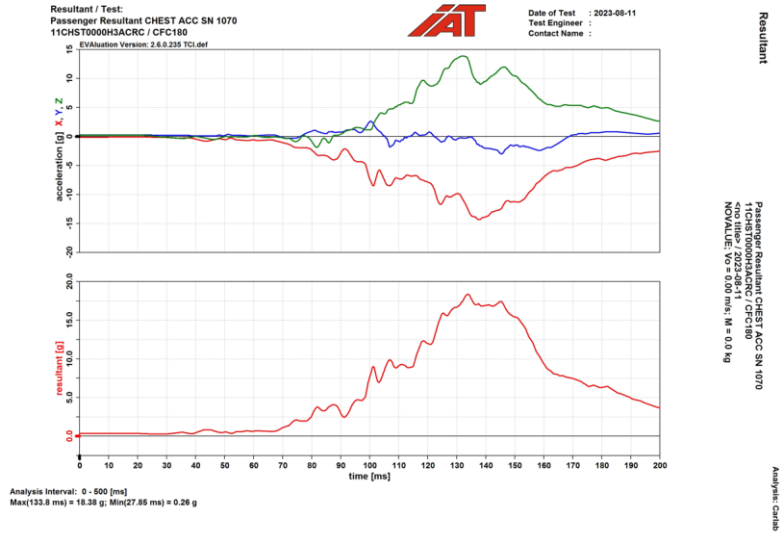
Test sonrasında koltukta kırık, keskin veya sivri uçlar bulunmamaktadır.



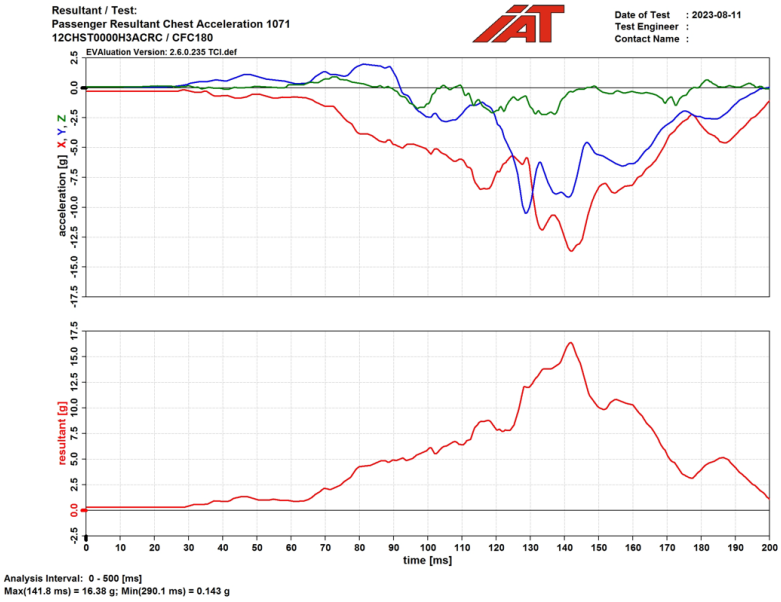
Şekil 3.38.1070 Dummy HIC Şematiği



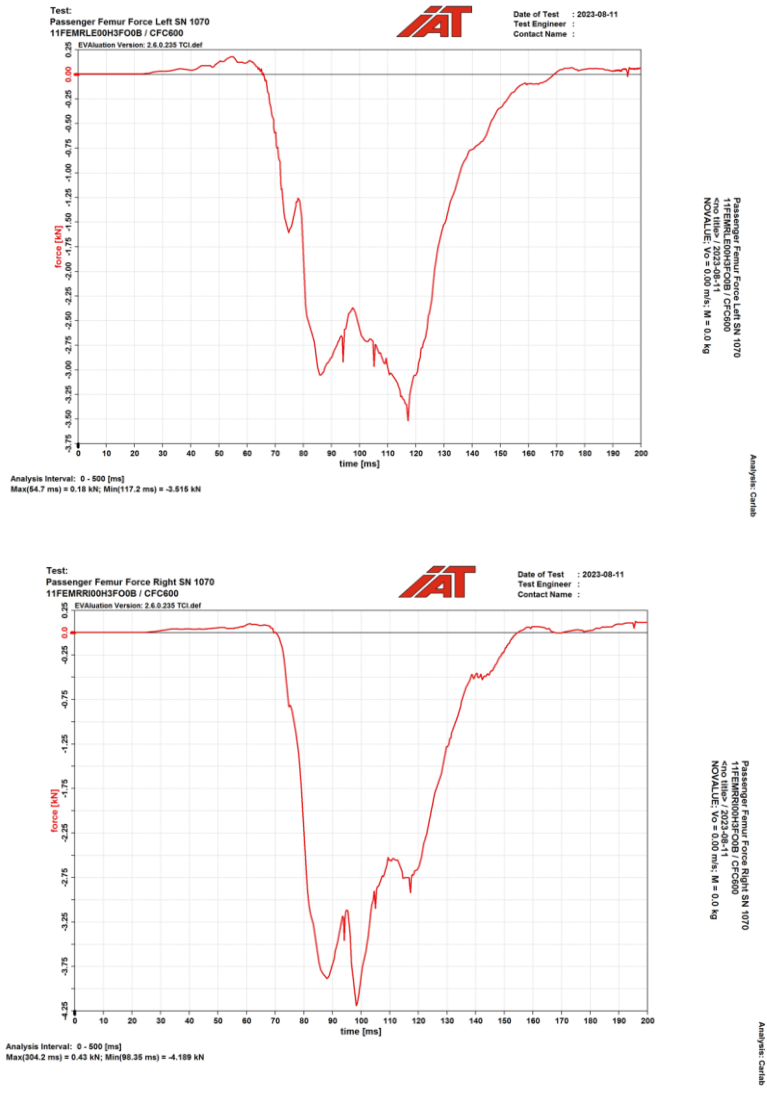
Şekil 3.39.1071 Dummy HIC Şematiği



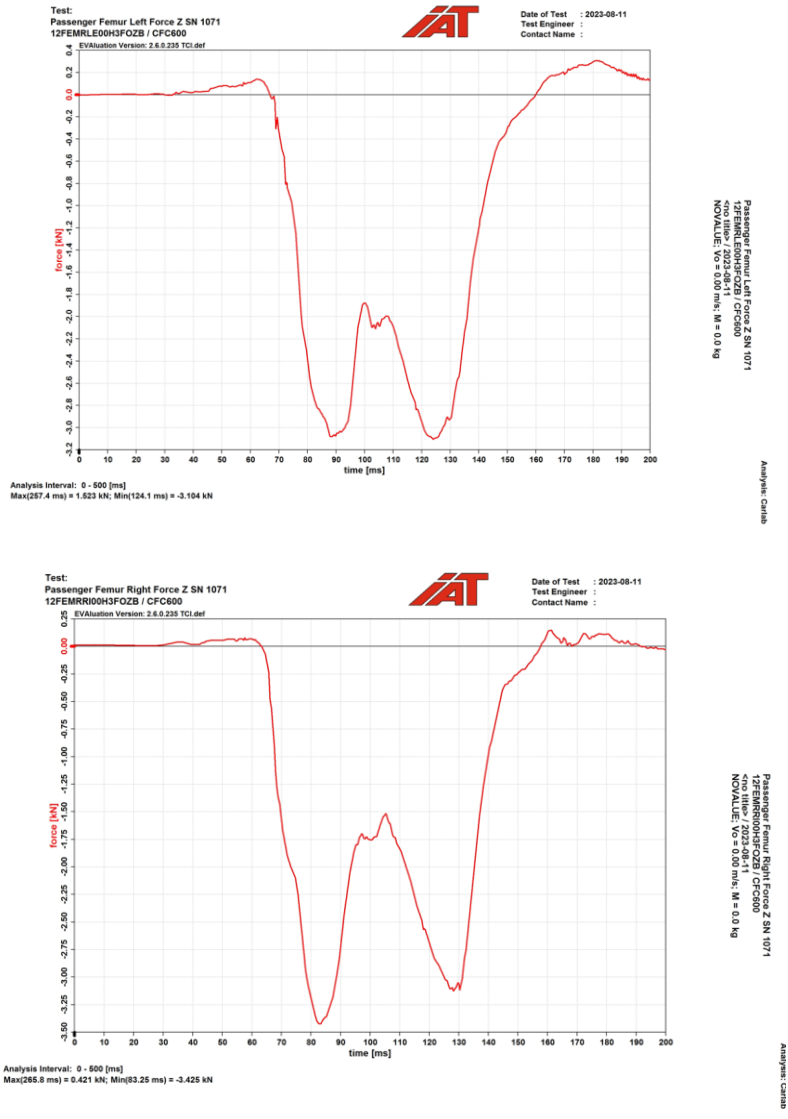
Şekil 3.40.1070 Dummy ThAC* Şematiği



Şekil 3.41.1071 Dummy ThAC* Şematiği



Şekil 3.42.1070 Dummy FAC** (Sol ve Sağ) Şematiği



Şekil 3.43.1071 Dummy FAC** (Sol ve Sağ) Şematiği

4. SONUÇ

Bu makalede, Atak Class II araçlarında yolcu koltuklarının R80 tip onayı süreci kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Test öncesinde, belirli standartlara uygun mankenler istenilen şekilde pozisyonlanmış ve testler gerçekleştirilmiştir.

1.Mock-up testinde, koltuk montajının yapıldığı braketteki kaynak somunun bulunduğu bölgede meydana gelen kopma, bu alanın yapısal olarak zayıf olduğunu ortaya koymuştur. Bu zayıflığı gidermek amacıyla, braketli yapı yerine kare profil ve içinde burç bulunan yeni bir tasarım uygulanmıştır. Yapılan tasarım değişikliği sonrasında gerçekleştirilen testte, önceki zayıflıkların giderildiği ve yapının beklenen performansı gösterdiği gözlemlenmiştir. Bu sonuç, yapılan tasarım değişikliğinin ilgili bölgedeki dayanıklılığı artırmada etkili olduğunu doğrulamaktadır.

2.Mock-up testinde, koltukların gövdeye montajında kullanılan M10x10.9 kalite cıvatalarda kesme deformasyonu tespit edilmiş, bu durum bağlantının yetersiz kaldığını ortaya koymuştur. Bu sorunun giderilmesi için M10x10.9 cıvatalar, daha yüksek kesme dayanımına sahip M12x10.9 cıvatalarla değiştirilmiştir. Yapılan bu optimizasyonun ardından gerçekleştirilen testlerde, cıvatalarda herhangi bir kesme veya kopma meydana gelmemiştir. Bu sonuçlar, M12x10.9 cıvata kullanımının bağlantı bölgesinde beklenen yükleri karşılayacak şekilde güvenliği ve yapısal bütünlüğü sağladığını göstermiştir.

Gerçekleştirilen mock-up testleri ve sonrasında yapılan yapısal iyileştirmeler, Atak Class 2 araçlarındaki koltuk montaj bölgelerinde karşılaşılan sorunların etkili bir şekilde çözüldüğünü kanıtlamıştır. Braket tasarımının güçlendirilmesi ve cıvata seçiminde yapılan optimizasyonlar, hem yapısal bütünlüğü hem de güvenliği önemli ölçüde artırmıştır. Elde edilen sonuçlar, araçların R80 tip onayı kriterlerine uygun hale getirildiğini ve güvenlik standartlarını başarıyla karşıladığını göstermiştir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde katkılarından dolayı, bilgi ve tecrübesiyle bizleri yönlendiren KARSAN OTOMOTİV'e ve araştırma sürecinde emeği geçen tüm çalışma arkadaşlarımıza teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

1. **Güzelsoy, F. A. 2011.** Ticari Araçlarda Güvenlik Mevzuatı Gereği Koltuk Bağlantı Dayanımını Artırmaya Yönelik Bir Uygulama, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.

2. **Arslan, A., Kaptanoğlu, M. 2010.** Bir Ticari Araç İçin ECE R14 Regülasyonuna Uygun Koltuk Bağlantılarının Geliştirilmesi. OTEKON 2010 – 5. Otomotiv Teknolojileri Kongresi, 07-08 Haziran 2010, Bursa.

3. Araç Tip Sınıflandırılması, <https://www.erelsigorta.com/index.php/arac-s%C4%B1n%C4%B1flari.html> Erişim tarihi : 02.06.2024

4. **Öztürk, F., Şendeniz, G. 2014**. Yolcu Koltuklarında Topoloji Tasarım Yaklaşımları İle Optimizasyon. OTEKON 2014 – 7 Otomotiv Teknolojileri Kongresi, 26-27 Mayıs 2014, Bursa.

5. **Şendeniz, G., 2013**. Araç Koltuk Bağlantılarının Benzetim Destekli Optimum Tasarımı, *Yüksek Lisans Tezi*, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı, 2013, Bursa.

6. **Li, Z., Ge, H., Zhang, J., Zhu, Y., 2013** The necessity of evaluating child neck injury in frontal collision of school bus for transportation safety. Safety Science, 2014

7. ECE R14, ECE R16, ECE R17, ECE R80 – Sürücü, Hostes ve Yolcu Koltukları Test Gereksinimleri <https://www.homologasyon.com/surucu-hostes-ve-yolcu-koltuklari-test-gereksinimleri/> Erişim tarihi: 26.11.2024

8. UN-Regulation No. 80 Additional Information to GRSP-62-35, < https://slideplayer.com/slide/14544331/> Erişim tarihi: 20.08.2024

9.ODTÜ-Biltir Merkezi – Taşıt Güvenliği Birimi , ECE R80 Dinamik test raporları, 2024

BÖLÜM 18

Asfalt Kaplamalarda Oluşan Bozulmalarda Üstyapı Yönetim Sistemlerinin Önemi

***Nimet İnkaya*[1]**

[1] Ardahan Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, İnşaat Bölümü, 75000, Merkez, Ardahan
ORCID: 0000-0002-1624-9578

1. GİRİŞ

Ulaşım, ekonomik, sosyal ve finansal sürdürülebilirlik sağlayarak yaşamın korunmasını artıran, performansı, endüstriler ve kullanım alanı arasında bağ kuran ve temel altyapı unsurlarından biridir. Ulaştırmanın büyüklüğü ve kalitesi ile ekonomik gelişme düzeyi arasındaki doğrudan ilişki gözlemlenmektedir. Bu nedenle, ekonomik aktörler arasındaki iletişim ve gelişimi sağlayan karayolu ulaşım sistemimiz, uluslararası ticaretin bir parçası haline gelen ülkemiz için küresel rekabet gücü anlamına da gelmektedir.

Dünya genelinde yaygın ulaşım biçimi olan karayolu ile bağlantılı, diğer ulaşım modları ile entegrasyona uygun olması, sürekli taşımayı sağlaması, turizme payı, ulusal güvenlikteki rolü ve bölgesel kalkınmaya destek gibi sebeplerle ulaşımda merkezi bir role sahiptir. Karayolları ve dağıtım zincirine yapılan yatırımlar; ulaşım aralıkları, verimlilik, dayanıklılık ve hizmet kapsamını arttırırken, ulaşım maliyetlerini düşürerek ekonomik büyüme ve üretkenliğe olumlu katkılar sağlar.

Ülkemizde, Karayolları Genel Müdürlüğü sorumluluğundaki karayolu ağı uzunluğu; 68.654 km, bitümlü sıcak karışım (BSK) kaplamalı yol ağı uzunluğu 29.879 km mertebelerine ulaşmıştır (Ağ uzunlukları, www.kgm.gov.tr sitesi 14.11.2024 tarihi itibari ile resmi olarak açıklanan son güncel verilerden alınmıştır). Bu durum ülkemizdeki gelişmelere bağlı olarak ortaya çıkan karayolu ihtiyacı artırmakta olup, karayolu ağının fiziki ve geometrik standartlarının mevcut ve gelecekteki trafik hacminin gerektirdiği niteliklere yükseltilmesini zorunlu hale getirmektedir.

Ülkemizde, gelişen karayolu ağı ve bu ağ içerisinde yer alan kaplamaların; planlama, programlama, proje, inşaat, takviye veya yenileme, bakım, onarım ve iyileştirmelerini kapsayan tüm faaliyetler ciddi bir maliyet getirmektedir. Gelişmekte olan ülkeler arasında olan ülkemizde, kaynakların daha verimli ve etkili bir biçimde kullanılmasını sağlamak amacıyla, karayolu ağı içindeki yollarda, üstyapı yönetim sistemi' nin uygulanmasını zorunlu hale getirmiştir. Üstyapı yönetim sistemleri var olan bütçeyi, yol üstyapılarının faaliyetlerini ve ihtiyaçlarını önceliklendirmeye ve tanımlamaya yardımcı olmak amacıyla güvenilir üstyapı envanter bilgileri ile yapısal ve fonksiyonel performans durum verilerini oluşturur (KGM, 2024). Üstyapı Yönetim Sistemlerinin (ÜYS) temel amacı, mevcut bütçeyle en yüksek verimi elde edebilecek optimum bakım ve iyileştirme öncelikleri belirlemek için nesnel ve sistematik yaklaşımlar geliştirmektir. Bu sistemler, Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) yöneticilerine, yolların iyileştirilmesi

için bütçeyi daha etkin kullanma konusunda yardımcı olarak, karar alma süreçlerinde kişisel inisiyatifi minimize eder (Yılmaz, 2011).

Buna dayanarak, bu çalışmada yol üstyapısı ve üstyapı yönetim sistemi hakkında genel bilgi verilmiş ve aralarındaki ilişki araştırılmıştır. Öncelikle yol üstyapısı ve üstyapı yönetim sistemleri hakkında genel bilgiler verilmiştir. Ardından aralarındaki ilişki detaylı bir şekilde incelenmiştir.

2. METOT

Bu çalışmada Web of Science ve Google Akademik veri tabanları kullanılmıştır. Literatür taraması belirtilen veri tabanlarında "deterıoratıons ın asphalt pavements", "superstructure management systems", "superstructure types", "UYS" ve "deterioration repair methods" terimleri kombinasyon halinde aratılarak yapılmıştır. Bu çalışmanın makale havuzu, bu tarama sonucunda bulunan yayınlardan konu ile ilgili çalışmalarla oluşturulurken, diğer çalışmalar elenmiştir. Bu çalışmanın alt başlıklarında, okuyucuya Bölüm 3'te yol üstyapısı hakkında genel bilgiler verilmiştir. Bölüm 4'te üstyapıda oluşan bozulmalar incelenmiştir. Bölüm 5 üstyapı yönetim sistemleri hakkında genel bilgiler verilmiştir. Çalışmanın son bölümünde, elde edilen bilgiler ışığında üstyapı yönetim sistemlerinin asfalt kaplamaların yapım, bakım ve onarımına ilişkin genel yorum ve değerlendirmeler yapılmıştır.

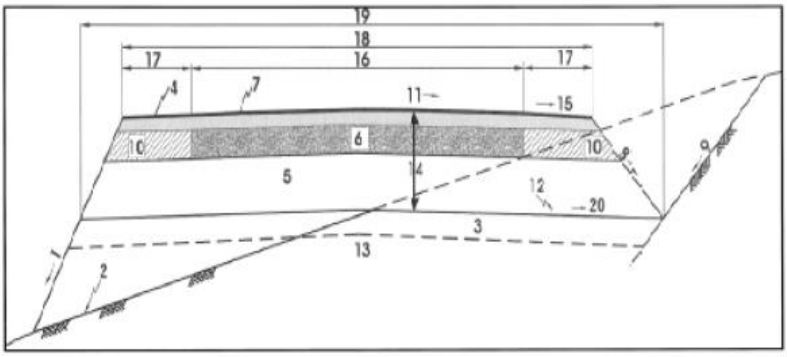
3. YOL ÜSTYAPISI

Ulaşım; ekonomik, sosyal ve çevresel sürdürebilirliği elde etmemizi sağlayan, yaşam kalitemizi artıran ve güçlendiren, işletmeler, endüstriler ve tüketiciler arasında bağlantı sağlayan her türlü kalkınmanın en temel yapısını oluşturmaktadır. Ekonomik gelişme düzeyi ile ulaştırma altyapısının büyüklüğü ve kalitesi arasında ehemmiyetli bir ilişki vardır (Ünal, Komut ve Kiziroğlu, 2018).

Türkiye'de ulaştırmanın büyük bir bölümünü karayolları oluşturmaktadır. Uzunluk olarak; 3 bin 726 km otoyol, 30 bin 864 km devlet yolu ve 34 bin 064 km il yolu olmak üzere toplam 68 bin 654 km karayolu ağına sahip Türkiye' nin; %51' sini sathi kaplamalı yollar, %43' sini asfalt betonu yollar, %6' sını da diğer yollar oluşturmaktadır (KGM, t.y.). Türkiye' de mevcut karayolların büyük bölümü sathi ve asfalt betonu kaplamalar (BSK ve Sathi) olarak esnek üstyapı şeklinde inşa edilmiştir. Üstyapılar;

- Esnek üstyapılar
- Rijit üstyapılar
- Kompozit üstyapılar

- olmak üzere üç şekilde inşa edilir.



Şekil 1. Yol Üstyapısı Tip Enkesiti (KGM, 2008)

3.1. Esnek Üstyapılar

Esnek üstyapılar, bitümlü kaplama tabakalarıyla oluşturulan yol yapılarıdır. Bu tür üstyapılar, trafik yüklerini kaplama, temel ve alt temel tabakaları aracılığıyla zemine dağıtarak tesviye yüzeyiyle sıkı bir temas sağlar. Üstyapının stabilitesi, kullanılan agrega ve bitümlü bağlayıcının mekanik özelliklerine, özellikle adezyon, tane sürtünmesi ve kohezyon gibi faktörlere bağlıdır. Esnek üstyapılar, genellikle çekme dayanımı düşük malzemelerden yapılmış alt temel, temel ve kaplama tabakalarından oluşur. Trafik yükleri, zemine doğru dağılır ve her bir tabaka bu yükü bir alt tabakaya ileterek daha geniş bir alana yayılmasını sağlar. Bu nedenle, her bir katman yükü azalan bir şekilde ileterek taban zeminine ulaşır. Üstyapıda meydana gelen gerilme değerleri, en üst tabakadan alt katmanlara doğru azalır; bu nedenle, malzemelerin mekanik özellikleri, bu gerilme dağılımına uygun şekilde seçilir. Asfalt beton kaplama tabakası, trafiğin ve iklimin etkilerine doğrudan maruz kaldığı için, kalıcı deformasyona, yorulmaya, esnekliğe, geçirimsizliğe, dayanıklılığa, kaymaya karşı dirence ve işlenebilirliğe de sahip olmalıdır.

Esnek üstyapılar, uygun şekilde projelendirilmediğinde aşağıdaki iki ana nedenden biriyle tahribat yaşayabilir:

- Taban zemininde veya yol üstyapısını oluşturan tabakalarda meydana gelen gerilmelerin, kullanılan malzemelerin sınır gerilme değerlerini aşarak iç dengenin bozulmasına ve kaymalara yol açması.
- Taban zeminindeki veya üstyapı tabakalarındaki yüksek basınç gerilmeleri ve nem oranındaki önemli değişiklikler sonucu büyük oturmaların oluşması; bu oturmalar üst tabakalarda çatlaklar ve kopmalar meydana getirebilir (Yayla, 2006).

Esnek üstyapılar ise;

- BSK kaplamalı,
- Sathi kaplamalı

olmak üzere ikiye ayrılır.

3.1.1. BSK Kaplamalı Üstyapılar

Özel asfalt üretim tesislerinde, belirli bir formülasyon doğrultusunda kaba ve ince agregaların bitümlü bağlayıcılarla karıştırılarak hazırlanan ve sıcak şekilde uygulanan kaplamalardır. Bu tür asfaltlar yüksek kaliteye sahiptir ve genellikle yoğun trafik akışına sahip yollarda tercih edilir (Yayla, 2006).

3.1.2. Sathi Kaplamalı Üstyapılar

Sathi kaplama, yol yüzeyine ince bir tabaka halinde asfalt, katran veya bunların karışımının serilmesi ve ardından üzerine agrega tabakasının serilerek yapılan bir kaplama türüdür (Yayla, 2006). Genellikle düşük yoğunluklu hafif taşıt trafiği olan yollarda kullanılır.

3.2. Rijit Üstyapılar

Rijit üstyapı, beton veya betonarme malzemelerle yapılan ve kaplama tabakasının kum, iri agrega, portland çimentosu ve su karışımından oluştuğu bir yapıdır. Bu üstyapılar, tek veya iki tabaka halinde dökülerek inşa edilir ve gerektiğinde granüler bir alt tabaka da eklenebilir. Rijit üstyapı, yükü büyük ölçüde elastik temel üzerine oturan beton plak (kaplama tabakası) aracılığıyla taşır. Orta ve yoğun trafik akışına sahip şehir içi yollarda kullanılan sağlam bir kaplama türüdür (Yayla, 2006).

3.3. Kompozit Üstyapılar

Kompozit üstyapılar, esnek ve rijit üstyapı türlerinin aynı yol kesiti üzerinde bir arada kullanılmasıyla oluşturulmaktadır. Genellikle rijit bir kaplamanın üzerine, sürüş konforunu artırmak amacıyla esnek bir üstyapı katmanı eklenerek inşa

edilmektedir. Bu tasarım yaklaşımı, dayanıklılık ve konfor unsurlarını ön planda tutmayı hedeflemektedir. Ayrıca, bu yapıların yüksek taşıma gücü kapasitesi sunduğu da belirtilmektedir (Yayla, 2006).

Karayolu ulaşımında dikkate alınması gereken temel unsurlardan biri ekonomidir. Türkiye'de hızla genişleyen yol ağı ve taşıt sayısındaki artış, ekonomik değerlendirmelerin ne kadar önemli olduğunu ortaya koymaktadır. Artan trafik yoğunluğu ve buna bağlı olarak kaplamada meydana gelen gerilmeler, yol üstyapısında daha sık problemlerin yaşanmasına ve yolların servis ömrünün kısalmasına neden olmaktadır. Bu durum, ciddi ekonomik kayıpları beraberinde getirmektedir. Ayrıca, yol yapımında kullanılan malzemelerin beklenen performans seviyesinin altında kalması ve iklim ile bölgesel koşulların yollara olumsuz etkileri, yolun hizmet süresini önemli ölçüde kısaltmaktadır. Yolun ekonomik ömrü boyunca verimli kullanılabilmesi ve hizmet süresinin uzatılabilmesi için, düzenli ve yeterli bakım çalışmaları yapılarak yol üstyapısının dayanıklılığının artırılması gereklidir. Bu yaklaşım sayesinde, karayolu işletimi uzun yıllar boyunca ekonomik açıdan sürdürülebilir bir seviyede tutulabilir (Bağdatlı ve Yıldırım, 2017).

4. ÜSTYAPIDA OLUŞAN BOZULMALAR

Üstyapıların proje ömrü ilerledikçe, trafik yükleri, çevresel koşullar, iklim değişiklikleri ve doğal etmenler gibi çeşitli faktörler nedeniyle zamanla yıpranma ve bozulma süreci başlar. Yollar uzun ve geniş yapılar olup, yol boyunca bozulmaya neden olan etkenler sürekli olarak değişir. Şartnamesine uygun şekilde inşa edilmiş olsa bile, mevcut zemin yapısı, nem oranı, iklim koşulları, trafik yoğunluğu ve farklı dingil yükleri gibi unsurlar, yolun durumunu etkileyebilir. Bu durum, yüzeyde farklı aksaklıkların ortaya çıkmasına ve kullanıcılar tarafından gözlemlenen bozulmalara yol açar (Hanlı, 2009).

Yol üstyapısındaki bozulmalar genel olarak iki şekilde sınıflandırılır: fonksiyonel bozulma ve yapısal bozulma. Fonksiyonel bozulma, üstyapının yerine getirmesi gereken işlevlerin yeterince verimli bir şekilde sağlanamaması durumudur. Yapısal bozulma ise, üstyapı bileşenlerinden birinin veya birkaçının kırılması, çökmesi ya da hasar görmesi anlamına gelir (Hanlı, 2009).

Yol üstyapısında bozulma ölçütleri:

- Servis yeteneği indeksi
- Tekerlek izi derinliği
- Çatlak
- Defleksiyondur.

Yol üstyapısının bozulma nedenleri ise;

- Tasarım hataları
- Yapım hataları
- Bakım hataları
- Trafik etkileri
- Çevre ve iklimin etkileri şeklinde sıralanabilir.

4. 1. BSK Kaplamalardaki Bozulma Türleri

Bitümlü sıcak karışım kaplamalarda trafik, iklim ve çevre koşullarından dolayı meydana gelen bozulma türleri;

➢ Şekil değiştirmeler

- Tekerlek izinde oturma (kalıcı deformasyon)

- Lokal (yerel) oturmalar

- Ondülasyonlar, ötelenmeler ve yoğrulmalar

- Tekerlek profil izi oluşması

➢ Çatlaklar

- Yorulma çatlakları (timsah sırtı çatlaklar)

- Termal (enine) çatlaklar

- Kenar çatlakları

- Boyuna çatlaklar

- Blok (harita) çatlakları

- Yansıma çatlakları

➢ Yamalar ve Çukurlar

- Çukurlar

- Yama bozulmaları

➢ Çok Yönlü Bozulmalar

- Ayrışma, sökülme ve soyulma

- Çizgisel agrega kaybı

- Bitümlü bağlayıcının terlemesi (kusma)

- Kaplama agregası kaybı

- Kayma direnci kaybı (cilalanma)

- Bombelikler

şeklinde sınıflandırılabilir (Hanlı, 2009).

4. 2. Sathi Kaplamalardaki Bozulma Türleri

Sathi kaplamalarda trafik, iklim ve çevre koşullarından dolayı meydana gelen bozulma türleri;

- Agregaların Cilalanması
- Mıcır Kaybı
- Çatlama
- Batma
- Tabaka Stabilite Eksikliği
- Kusma veya Terleme
- Ondülasyon

şeklinde sıralanabilir (Yılmaz, 2011).

4. 3. Esnek Yol Üstyapılarında Meydana Gelen Yüzey Bozulmalarının Nedenleri ve Değerlendirilmesi

"Üstyapının özgün fiziksel koşullarından sapması" şeklinde tanımlanan bozulmalar, tahmin edilenden fazla trafik artışı, ağır iklim koşulları, yol yapımında projeye ve teknik standartlara uygun olmayan altyapı çalışmaları, bakım faaliyetlerinin yetersizliği veya birimler arası koordinasyon eksiklikleri gibi nedenlerden kaynaklanabilir. Yol, mühendislik yapıları arasında kendine özgü bir yapıya sahiptir ve uzunluğu boyunca etkileyen faktörler sürekli değişir. Zemin özellikleri, nem oranı, iklim koşulları ve trafik yoğunluğu gibi unsurlar yol üzerinde doğrudan etkilidir. Yol kaplamalarında ortaya çıkan bozulmalar genel olarak trafik yükü, iklimsel etkiler ve tasarım ile yapım hatalarından kaynaklanır. Esnek kaplamalı yollar için ise bu kusurlar, trafik ve çevresel etkiler, iklimsel koşullar, yapım ve tasarım hataları ile malzeme kaynaklı sorunlar şeklinde sıralanabilir. (Bağdatlı ve Yıldırım, 2017).

Esnek yol üstyapılarında yüzey bozulmalarının değerlendirilmesinde dikkate alınması gereken önemli bir diğer unsur, bozulmanın ilerleyiş sürecidir. Genel olarak, bozulma, üstyapı tabakalarının trafik yüklerini dağıtma performansını

doğrudan etkiler. Üst tabakalar, kesme gerilmelerine ve yatay kuvvetlere dayanıklı olmalı, taban zemini ise düşey yüklerin etkisini dağıtma kabiliyetine sahip olmalıdır. Üstyapının geometrik düzgünlüğünde azalma, çeşitli bozulma türlerinin birleşik etkileriyle oluşan bir bozulma zincirinin sonucudur ve bu durum farklı bozulma şekillerini bir arada barındırabilir. (Hergüner, 2009).

OLUŞMA NEDENLERİ / BOZULMA TİPLERİ	Trafik Etkisi	İklim ve Çevre Etkisi	Kötü Malzeme Kullanımı	Kötü Yapım Teknikleri	Kötü Bakım Teknikleri	Asfaltın yaşlanması	Yetersiz Sıkıştırma	Yetersiz Drenaj	Yetersiz Taşıma Gücü	Yetersiz Üstyapı Boyutları	Şişme ve Büzülmelerin Etkisi	Önceki Bozulmaların Etkisi
Timsah Sırtı Çatlaklar	X	X	X	X	X			X	X			
Kenar Çatlakları	X	X						X	X	X		
Enine Çatlaklar		X	X	X	X						X	X
Boyuna Çatlaklar	X	X	X	X	X		X	X	X			
Blok (Harita) Çatlakları		X				X					X	X
Tekerlek İzinde Oturmalar	X	X	X				X	X	X			
Ondülasyon, Öteleme ve Yoğrulmalar	X		X	X	X		X		X			
Yerel Oturmalar ve Kabarmalar		X		X	X		X	X	X			
Tekerlek Profil İzi	X	X		X								X
Çukurlar			X	X	X					X		X
Segregasyon, Sökülme ve Soyulmalar	X	X	X	X		X	X					
Kaplama Agregası Kaybı	X	X	X	X	X							X
Çizgisel Agrega Kaybı			X	X								
Bitümün Terlemesi	X	X	X	X	X							X

Şekil 2. Esnek üstyapılardaki yüzey bozuklukları, oluşum sebepleri (KGM, 2008)

Yol kaplamalarında görülen bozulmalar; çatlama, dağılma ve kalıcı deformasyon olmak üzere üç ana gruba ayrılabilir. Bu bozulmalar genel olarak yüzey ve yapısal bozulmalar şeklinde sınıflandırılır. Yüzey bozulmaları arasında yetersiz kayma direnci, mikro doku kaybı (cilalanma), makro doku kaybı, soyulma ve çatlaklar öne çıkmaktadır. Yapısal bozulmalar ise üstyapının deformasyona karşı düşük direnç göstermesi sonucu yorulma, oyuklanma, ondülasyon ve altyapı tabakalarında ani değişimlerin neden olduğu sorunlar şeklinde tanımlanabilir.

Üstyapı yüzey bozulmalarının değerlendirilmesi, bozulma tipinin belirlenmesini, şiddetinin ve yoğunluğunun ölçülmesini ve bazı durumlarda yerinin tespit

edilmesini mümkün kılar. Genellikle incelenen parametreler arasında yüzey kusurları, kalıcı deformasyon veya çarpılma, çatlaklar ve yamalar yer almaktadır (Hergüner, 2009).

Esnek Üstyapı Bozulmaları	Projelendirme Kriterleri			
	Trafik	İklim ve Bölge	Malzeme	Üstyapı Tabanı
Kabarma		✓		
Çökme		✓	✓	✓
Ondülasyon	✓		✓	
Tekerlek izi oluşumu	✓			
Çukur			✓	
Kusma			✓	
Sökülme			✓	
Agrega soyulması			✓	
Agrega cilalanması			✓	
Yansıma çatlakları	✓	✓		
Büzülme çatlakları			✓	✓
Ek yer çatlakları			✓	
Kenar çatlakları	✓		✓	
Kayma çatlakları	✓			
Timsah sırtı çatlaklar				✓

Şekil 3. Esnek üstyapıların projelendirme kriterleri (Bağdatlı ve Yıldırım, 2017)

5. ÜSTYAPI YÖNETİM SİSTEMİ (ÜYS)

Üstyapı Yönetim Sistemleri (ÜYS); yolların mevcut durumunun belirlenmesi sonrasında, trafik, çevre ve iklim koşuları altında gelecekteki durumunu tahmin ile; bakım-onarım alternatifleri belirleyerek gerekli fayda-maliyet analizlerinin yapılması sonucu, en optimum çözümlerin belirlendiği sistemdir. Bu sistem ile, temelde yatırımların en uygun harcamalarla doğru, güvenli ve ekonomik olarak yol üstyapılarının işletimini sağlamayı amaçlayan çalışmaların tamamı koordine edilerek, karar vericilere yol gösterilmektedir.

Üstyapı yönetim sistemleri; karayolu fiziki varlıklarının maliyet etkin şekilde işletilmesi, iyileştirilmesi ve sürdürülebilmesini sağlayan sistematik süreçlerden en önemlisi, tüm hizmet süresi boyunca toplam ömür döngü maliyeti en yüksek olan yol üstyapılarının yönetilmesidir. Üstyapı Yönetim Sisteminin amacı, üstyapılarını kabul edilebilir bir servis kabiliyetinde en düşük yaşam döngüsü maliyeti ile yönetilmesidir. En düşük kullanım ömrü maliyeti, maliyet verimliliğinde en yüksek önceliğe sahiptir. Üstyapılarda takviyelendirme çok erken yapılırsa, üstyapı ömrü yeterince değerlendirilmemiş ve boşa gitmiş olacağı gibi, çok geç kalınmış olması durumunda da artan taşıt işletme maliyetleri, çok daha yüksek maliyetli onarımlar, takviyeler, son derece masraflı yeniden yapımlar gündeme gelebilecektir (Ünal, Komut ve Kiziroğlu, 2018).

Üstyapı Yönetim Sistemleri (ÜYS), ağ düzeyi ve proje düzeyi olmak üzere iki farklı kapsamda uygulanabilmektedir. Ağ düzeyinde, geniş bir proje grubu veya tüm karayolu ağı üzerinde bakım çalışmalarının nerede, ne zaman ve hangi türde yapılacağına dair kararlar alınırken, proje düzeyinde ise belirli projelere yönelik daha spesifik ve uygulamaya dönük teknik yönetim stratejileri geliştirilmektedir. ÜYS kullanımının teknik, ekonomik ve yönetimsel avantajları şu şekilde sıralanabilir:

- Daha güvenli, konforlu, uzun ömürlü ve ekonomik bir yol ağı sağlanması,
- Üstyapı ömrü boyunca karşılaşılabilecek sorunların zamanında ve en uygun maliyetle çözülmesi,
- Bakım ve onarım için ayrılan kaynakların azaltılması,
- Yol yapımında kullanılan malzemelerden tasarruf edilmesi,
- En uygun bütçe planlarının hazırlanabilmesi (AMSC, 2008):

ÜYS‘ nin gelişimi için gerekli üç önemli husus (Haas, 2007):

1. Kurumsal Açıdan;
   - ✓ Başarılı planlama,
   - ✓ İyi yönetim,
   - ✓ Özelleştirmeye uygulanabilir olmak.
2. Teknik Açıdan;
   - ✓ Network ağı ve proje seviyeleri,
   - ✓ Uzun dönemde en iyi kalitede üstyapı kaplaması,
   - ✓ Farklı trafik ve çevre koşullarında performans modelleri.
3. Ekonomik ve ömür döngüsü açılarından;
   - ✓ Ölçülebilir faydalar,
   - ✓ Ekonomik değerlendirme programları,
   - ✓ Uzun dönem ömür-döngü analizleridir.

Türkiye'de her yıl yeni yolların inşa edilmesi ve mevcut yolların iyileştirilmesiyle toplam yol uzunluğu artmaktadır. Bu durum, karayolu ağının bakım ve onarımı için oldukça yüksek bütçelere ihtiyaç duyulmasına yol açmaktadır. Sınırlı

kaynaklara sahip olan ülkemizde, bu kaynakların daha etkin ve verimli kullanılması amacıyla, karayolu ağı içerisindeki esnek yol üstyapılarında Üstyapı Yönetim Sistemleri'nin (ÜYS) uygulanması bir zorunluluk haline gelmiştir (Hergüner, 2009).

Dünyada kullanılan üstyapı yönetim sistemlerinden bazıları:

- Minnesota Dot (MNDOT) üstyapı yönetim sistemi

- Metropoliten Ulaştırma Komisyonu (MTC) Üstyapı Yönetim Sistemi

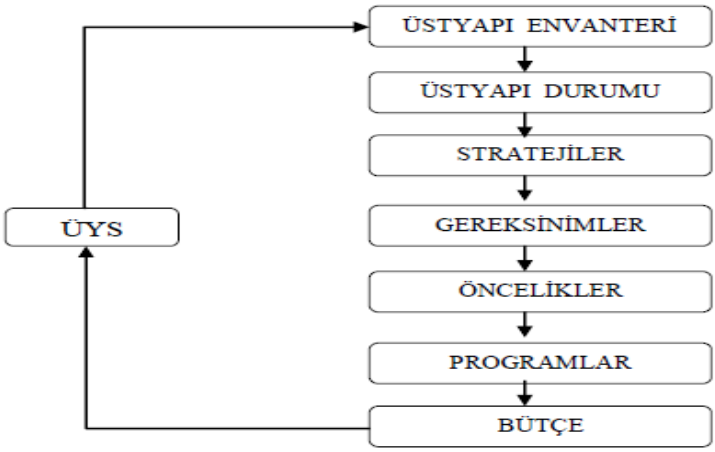
- Samp Sistemi

- Karayolu Tasarım ve Bakım Standartları Modeli (HDM)dır.

Üstyapı Yönetim Sistemi'nin (ÜYS) temel bileşenleri (ASTM E 1166) beş ana başlık altında toplanabilir: yol tanıtım bilgileri, bilgi toplama, veri tabanı yönetimi, geri besleme ve uygulama. Bir ÜYS' den beklenen özellikler arasında, bilgi ve modellerin revize edilmesi durumunda sistemin kolayca güncellenebilir ve düzenlenebilir olması ile farklı strateji seçeneklerinin tamamını değerlendirebilmesi yer almaktadır (Haas, Hudson ve Zaniewski, 1994; Holt ve Gramlıng, 1992). Bu hedeflere ulaşmak için, yapay zeka veya gelişmiş teknolojik analiz sistemlerinden faydalanılarak yeni yazılımlar geliştirilmesi gerekmektedir. Son yıllarda yaygınlaşan yaklaşımlardan biri de Coğrafi Bilgi Sistemi (GIF) kullanımıdır. GIF, ÜYS' nin temelini oluşturan bilgilerin düzenli ve sistematik bir şekilde depolanmasını sağlamaktadır. (NCHRP SYNTHESIS 335, 2004).

- Kesim tanımlamalarıyla ilgili veriler,
- Performansla ilgili veriler: düzgünlük, yüzey bozulmaları, sürtünme, defleksiyonlar, malzeme özellikleri,
- Önceki yıllara ait veriler: bakım ve yenileme tarihleri, trafik verisi, kazalar,
- İşletme politikasıyla ilgili veriler: bütçe, bakım ve iyileştirme seçenekleri,
- Geometri verileri: enine ve boyuna eğim, banket ve kurb,
- Çevresel veriler: drenaj, iklim koşulları,
- Harcama verileri: yenileme, bakım, iyileştirme ve kullanıcı harcamaları.

Bu verilere her zaman erişim sağlanabilmeli, istatistiksel analizler ve grafik gösterimler yapılabilmelidir. Kullanıcı, gerekli durumlarda detaylı bilgilere ulaşarak istenilen sonuçları raporlayabilmelidir (Shahin, 1994). ÜYS‘ nin temel yapısı şekil 4’ de özetlenmiştir.



Şekil 4. ÜYS’ nin temel yapısı (Holt ve Gramlıng, 1992)

6. SONUÇLAR

Üstyapı yönetim sistemi, farklı yönetim seviyelerinde en uygun stratejilerin belirlenmesini ve bu stratejilerin uygulanmasını içeren bir sistemdir. Aynı zamanda veri toplama, değerlendirme ve üstyapıların yenileme, bakım ve onarım gibi süreçleri kapsayarak, üstyapının servis seviyesini periyodik olarak izleyen işlemleri de içerir.

Gelişmiş ülkelerde yaygın olarak kullanılan bu sistem, AB sürecindeki Türkiye için karayolu sektöründe teorik ve pratik anlamda AB standartlarıyla uyumlu çalışmalar yapmayı ve buna göre planlama, programlama ve değerlendirme süreçlerini oluşturmayı oldukça önemli kılmaktadır.

Karayolu ağında sistematik ve periyodik ölçümlerle elde edilen veriler (yüzey düzgünsüzlüğü, iklim verileri, asfalt kaplama sıcaklıkları, trafik yükleri gibi) kullanılarak, karayolu kesimlerinin hizmet ömrü boyunca üstyapı bozulmalarının ne zaman ve nerede meydana geleceği tahmin edilebilir. Bu veriler, iyileştirme gereksinimlerinin belirlenmesi ve karar vericilere rehberlik edilmesi amacıyla üstyapı yönetim sistemlerinde kullanılmaktadır. Küresel ısınma nedeniyle değişen iklim koşullarının yollar üzerindeki etkisi, bu sistemlerin bakım ve onarım süreçlerinde büyük bir öneme sahip hale gelmesini sağlamıştır.

Bu çalışma, dünya çapındaki ağlarının sürdürülebilir bakım ve bakım serilerinde Üstyapı Yönetim Sistemlerinin (ÜYS) kritik rolüyle ortaya çıkıyor. Artan trafik yükleri ve özellikle iklim koşulları, asfalt kaplamalarda ciddi bozulmalara yol açmaktadır. Sıcaklık değişimleri, aşırı yağışlar ve diğer iklimsel faktörler, yol yüzeylerinin ömrü kısalmakta ve bakım gereksinimi artmaktadır. Bu iklim, iklim değişikliği ve sıcaklık verilerinin doğru bir şekilde analiz edilmesi, asfalt kaplamaların daha verimli tasarlanması için büyük önem taşımaktadır. Üstyapı Yönetim Sistemleri, bu tür portföy değişkenlerine uyum sağlayacak şekilde, sınırlı kaynaklarla optimum bakım ve görünümleri belirleyerek, daha sürdürülebilir bir yol sunumunun sürdürülmesine katkı sunmaktadır. Değişen iklim koşullarının asfalt kaplamaları, dışarıda göz önünde bulundurularak, sistemsel bir yaklaşımla yol ömrü uzatılabilir ve bakım maliyetleri en aza indirilebilir. Ayrıca, sıcaklık ve iklim verilerinin birleştirilmesi, karar verme bileşenlerinde daha objektif ve etkin bir yönetim olanağına olanak tanınmaktadır.

Değişen iklim koşulları, özellikle sıcaklık dalgalanmaları, asfalt kaplamalar genellikle çatlamalar, çukurlar ve diğer kırılmalarla karşılaşmaya neden olmaktadır. Bu durum, yollarının bakım maliyetlerini artırmakta ve bakım maliyetlerini yükseltmektedir. Üstyapı Yönetim Sistemlerinin, bu iklimsel değişkenleri dikkate alarak yollarını daha dayanıklı hale getirme stratejileri geliştirmesi, uzun süreli önemli tasarruflar sağlamak için büyük bir fırsat sunmaktadır.

Buna ek olarak, sıcaklık verilerinin ve iklimsel değişikliklerin yol bakımına entegre edilmesi, yol ömrünün uzatılması ve bakım maliyetlerinin daha verimli bir şekilde yönetilmesi açısından kritik bir özelliğine sahiptir. Bu tür kayıtlı sistemlerin bir şekilde genişletilmesi ve analiz edebilir olması, asfalt kaplama bozulmalarını zamansal anlamda tahmin edilebilir kılmasına olanaklar tanınır ve bakım sistemleri daha zamanında ve hedefe yönelik bir şekilde yapılmasına olanak verir. Sonuç olarak, iklim koşullarındaki değişimlerin karayolları üzerindeki dağılımı dikkate alınarak, üstyapı yönetim sistemlerinin yaygınlaştırılması ve ayrıştırılması hem ekonomik hem de çevre sonuçlar doğuracaktır. Bu sebeplerden ötürü ÜYS sistemleri hem mevcut bütçesinin doğru kanallar ile yönetilmesini hem de hızlı değişen durumlardan etkilenen yol ağlarının bakım/onarım tespitleri veyahut genişletilmesi çalışmalarının takip edilmesine olanak sağlar.

KAYNAKÇA

AMSC. (2008, Ocak). *NJDOT Pavement Management System,*. New Jersey.

Bağdatlı, M. E. C. ve Yıldırım, M. Ş. (2017). Karayolu Üstyapılarındaki Bozulmaların Bakım Maliyetlerine Etkisi. *Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi*, *6*(1), 102-111. doi:10.17100/nevbiltek.304473

Haas, R. (2007). Future of Pavement Management Systems. *National Pavement Management Conference* içinde . Norfolk.

Haas, R., Hudson, W. R. ve Zaniewski, J. (1994). Modern Pavement Management. *Krıeger Publıshıng Company*.

Hanlı, E. (2009). *Esnek Yol Üstyapısında Oluşan Bozulmalar Ve Değerlendirmesi*. *İSTANBULTeknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*.

Hergüner, A. T. (2009). *Türkiye Otoyol Ağı için Üstyapı Yönetim Sistemi*.

Holt, B. F. ve Gramlıng, W. L. (1992). Pavement Management İmplementation. ISBN 0-8031-1421-4.

KGM. (t.y.). Devlet ve İl Yol Envanteri. 14 Kasım 2024 tarihinde https://www.kgm.gov.tr/Sayfalar/KGM/SiteTr/Istatistikler/DevletveIlYolEnvanteri.aspx adresinden erişildi.

KGM. (2008). *Karayolları Esnek Üstyapılar Projelendirme Rehberi*.

KGM. (2024). *Üstyapı Yönetim Sistemi (ÜYS) Rehberi*. *Karayolları Genel Müdürlüğü Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı*. Ankara.

NCHRP SYNTHESIS 335. (2004). *Pavement Management Applications Using Geographic Information Systems*.

Shahin, M. Y. (1994). *Pavement Management for Airports, Road and Parking Lots*. New York: Springer.

Ünal, E. N., Komut, M. ve Kiziroğlu, S. (2018). Üstyapı Yönetim Sisteminin Geliştirilmesi ve Ağ Seviyesinde Değerlendirmeler. *Karayolu 4. Ulusal Kongresi ve Sergisi* içinde (ss. 81-95).

Yayla, N. (2006). *Karayolu Mühendisliği*. Birsen Kitapevi.

Yılmaz, T. (2011). *Karayolu Üstyapı Yönetim Sistemi ve Kocaeli İli Başiskele İlçesi Uygulaması*.

BÖLÜM 19

Dünya ve Türkiye Çimento Fabrikalarında CO_2 Kaynakları, Etkileri ve Azaltım Stratejileri

Fatma Dikçal Akarsu[1] & Halil Dertli[2] & Didem Saloğlu Dertli[3]

[1] Dr., İstanbul Şişli Meslek Yüksekokulu, İstanbul, Türkiye, ORCID: 0000-0001-6498-7594
[2] Kimya Yük. Müh., İTÜ, Kimya Metalurji Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, İs-tanbul, Türkiye, ORCID: 0000-0001-6498-7594
[3] Prof. Dr., İTÜ, Afet Yönetim Enstitüsü, Afet ve Acil Durum Yönetimi Anabi-lim Dalı, İstanbul, Türkiye, ORCID: 0000-0003-0503-056X

GİRİŞ

Küresel ısınmanın ana nedeni olarak gösterilen CO_2'in atmosferde artışı fosil yakıtların yakılması, ulaşım, tarımsal faaliyetler, arazi kullanımı değişikliği, endüstriyel faaliyetler gibi insan kaynaklı etmenlere bağlıdır. (Nunes, 2023) Atmosferde biriken insan kaynaklı (antropojenik) CO_2 küresel ısınmayı tetikleyerek aşırı hava olayları, buzulların erimesi, deniz seviyesinin yükselmesi gibi birçok olumsuz çevresel etkiyi beraberinde getirmekte ve insan yaşamını olumsuz etkilemektedir. (IPCC, 2021)

Sektörel bazda antropojenik CO_2'ın ana kaynağı yüksek enerji gerektiren endüstriyel işletmelerdir. Yüksek enerjinin elde edilmesi için kullanılan fosil kaynaklı yakıtların yanması sonucu atmosfere yoğun miktarda CO_2 salınımı olmaktadır. Endüstri sektöründe demir ve çelik endüstrisi yıllık 2,32 Gt CO_2 (%28) salınımı ile ilk sırada yer alırken bunu 2,24 Gt CO_2 (%27) salınım ile çimento sektörü ve 1,1 Gt CO_2 (%13) ile kimya sektörü takip etmektedir (IEA, 2017).

Çimento sektörü hali hazırda fosil yakıtların kullanıldığı yüksek derecede ısı gerektiren bir üretim prosesine sahip olduğu için yüksek oranda CO_2 salımından sorumludur (Uwasu vd., 2014). Uluslararası Enerji Ajansı'nın Referans Teknoloji Senaryosuna göre, 2050 yılına kadar küresel çimento üretiminin, mevcut seviyesinden %12-23 daha fazla olması beklenmektedir bu durumun CO_2 emisyonunda %4'lük bir atışa neden olacağı öngörülmektedir.

Çimento sektörünün karbon ayak izini küçültmek için çeşitli stratejiler geliştirilmiştir. Bu stratejiler arasında enerji verimliliğini artırma, düşük karbonlu alternatif yakıtlara geçiş, klinker-çimento oranını düşürme, karbon yakalama ve depolama teknolojilerinin entegrasyonu ve yenilikçi üretim süreçlerinin geliştirilmesi sayılabilir. Bu önlemler sayesinde, 2050 yılına kadar çimento üretimindeki artışa rağmen, sektörün karbon emisyonlarında önemli bir düşüş sağlanması beklenmektedir. Özellikle klinker-çimento oranının düşürülmesiyle ve karbon yakalama sistemlerinin kullanımıyla, CO_2 emisyonunda sırasıyla %37 ve %48'e varan azalmalar sağlayabileceği öngörülmektedir. Bu nedenle çimento sektörü, CO_2 emisyonlarını azaltmak için enerji verimliliğini artırma, alternatif yakıt kullanımı ve klinker ikamesi gibi geleneksel yöntemlere ek olarak, karbon yakalama ve depolama (KYD) gibi yenilikçi teknolojilere yönelmiştir. (Farahiyah, 2017)

KYD teknolojileri, çimento üretimi sırasında ortaya çıkan CO_2'yi yakalayarak atmosferden uzaklaştırmayı ve güvenli bir şekilde depolamayı hedeflemektedir. Bu sayede, 2050 yılına kadar sektördeki CO_2 emisyonlarında büyük düşüşler hatta sıfır emisyon hedefine ulaşması hedeflenmektedir. Ancak, KYD teknolojilerinin yaygınlaşması ve etkin bir şekilde kullanılabilmesi için teknik, ekonomik

ve çevresel birçok faktörün dikkate alınması gerekmektedir. (Dziejarski, vd., 2023) Bu teknolojilerin avantajları ve dezavantajları üzerine yapılan araştırmalar ve tartışmalar, çimento endüstrisinin sürdürülebilir bir geleceğe geçişinde ve küresel iklim değişikliğiyle mücadelede kritik bir rol oynamaktadır. (IEA, Cement, 2023)

ÇİMENTO ÜRETİMİNDE CO_2 KAYNAKLARI

Çimento üretimi, temel olarak kireçtaşı gibi karbonatlı kayaçların yüksek sıcaklıklarda (yaklaşık 1400 °C) ısıtılması ve klinker adı verilen bir ara ürünün elde edilmesi üzerine kurulu bir süreçtir. Bu süreçte kireçtaşı, termokimyasal bir reaksiyonla kalsiyum oksit (kireç) ve karbondioksit gazına dönüşür. ($CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2$). Çimento üretiminde gerekli olan bu termokimyasal reaksiyon, fosil yakıt ve elektrik kullanımından kaynaklı emisyonlara ek olarak CO_2 salınımını gerçekleştirmektedir. (Liu, vd., 2020).

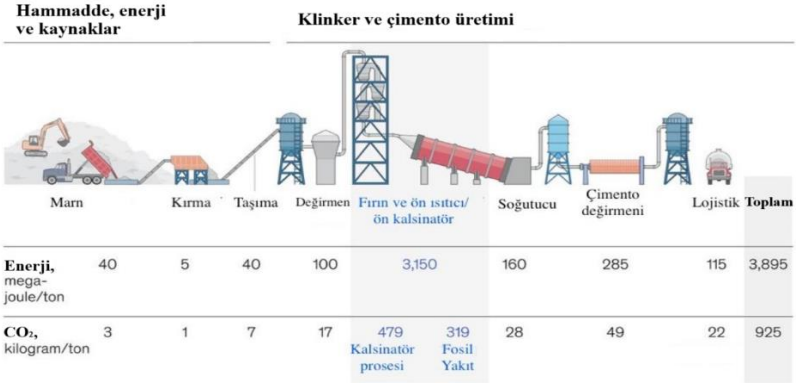
Çimento üretimi, ton başına yaklaşık ortalama olarak 0,9 ton CO_2 salınımı ile küresel sera gazı emisyonlarının %5-8'lik önemli bir kısmından sorumludur. (Ige, vd., 2024). Çimento üretim süreci üç kısma bölündüğünde ortaya çıkan CO_2 emisyonunun kaynakları şu şekildedir;

1. Klinker üretimi: Kireçtaşı başta olmak üzere çeşitli hammaddelerin yüksek sıcaklıkta (yaklaşık 1400 °C) kalsinasyon işlemine tabi tutularak kalsiyum karbonattan kalsiyum okside dönüştürülmesi ve ardından yeni mineral oluşumuyla sonuçlanan kompleks bir süreçtir. Bu süreçte meydana gelen termal ayrışma reaksiyonu,

2. $CaCO_3(k) + ısı \rightarrow CaO(k) + CO_2(g)$ şeklinde ifade edilmektedir. Klinker üretim süreci, çimento endüstrisindeki emisyonların yaklaşık %50 oranında katkıda bulunan birincil faktördür. (IEA,2023)

3. Kalsinasyon işlemleri sırasında fosil yakıtların yakılması sonucu ortaya çıkan karbondioksit emisyonları, üretim sürecindeki toplam emisyonların yaklaşık %40'ını oluşturmaktadır. Hammadde olarak kullanılan kireçtaşı, kil ve benzeri malzemelerin, kalsinasyon öncesinde istenen fiziksel ve kimyasal özelliklere kavuşturulması amacıyla gerçekleştirilen kırma, öğütme, karıştırma ve homojenleştirme işlemleri, yüksek enerji tüketimi gerektirmektedir. Bu işlemler sırasında kullanılan elektrik enerjisi üretimi için genellikle fosil yakıtlar tercih edildiğinden, dolaylı olarak sera gazı emisyonlarına katkıda bulunulmaktadır. (Chatterjee, 2018)

4. Hammaddelerin taşınması, motorlarının ve tesislerin çalıştırılması için kullanılan elektrikten kaynaklı emisyonlar ise toplam emisyonun %10'unu oluşturur. (Tomatis vd., 2020) (Şekil 1).



Şekil 1. Çimento üretimi esnasında açığa çıkan CO_2 miktarı (WEB-1, 2024)

Çimento sektöründeki karbondioksit emisyonu kaynaklarının detaylı bir şekilde belirlenmesi ve karakterize edilmesi, emisyon azaltım stratejilerinin geliştirilmesi sürecinde kritik bir öneme sahiptir. Çimento sektöründe doğrudan ve dolaylı yoldan ortaya çıkan CO_2'in kaynakları detaylı olarak Çizelge1'de verilmiştir.

Çizelge 1: Çimento endüstrisinde CO_2 emisyonunun kaynakları (Khaiyum vd., 2023).

Parametreler	Tanım
Termokimyasal reaksiyon	Kireç taşının ($CaCO_3$) ayrışma yoluyla kirece (CaO) dönüşmesiyle ortaya çıkar.
Klinker kalitesi	Klinker CO_2 yoğundur. Birincil kireçtaşı, silisyum oksit, alüminyum oksit ve demir oksit karışımının yakılmasıyla oluşur. Klinker kalitesi ne kadar yüksek olursa, CO_2 emisyonları da o kadar yüksek olur.
Ham maddelerin ön ısıtması	CO_2 emisyonlarının önemli kaynaklarından biri, 1000 °C'nin üzerinde ısıtılması gereken ham maddelerin ön ısıtılmasıdır.
Yakıttaki organik ve inorganik karbon	Yakıtta ne kadar çok inorganik karbon varsa, o yakıtın yanmasından kaynaklanan karbon emisyonu da o kadar fazla olur.
Yakıt yakma	Çimento fırınında 1200 ile 1400 °C arasındaki sıcaklıklarda fosil yakıtın yakılmasından kaynaklanan CO_2 doğrudan emisyonlarıdır. Bu emisyonlar ön ısıtma, ön kalsinasyon ve pişirme fırınlarından kaynaklanmaktadır.
Elektrik tüketimi	Hammaddelerin ezilmesi, toz haline getirilmesi ve çimento üretimi dahil olmak üzere çimento üretiminin çeşitli aşamalarındaki enerji kullanımından kaynaklanan dolaylı emisyonlardır.
Hammadde ve bitmiş ürünlerin taşınması	Hammaddelerin ve bitmiş ürünlerin taşınması, dolaylı olarak CO_2 emisyonlarına katkıda bulunur.
Çimento öğütme	Çimento öğütme, çimento üretiminin üç aşamasından birisidir. Çimentonun ezilmesi, öğütülmesi ve kurutulması işlemlerinde kullanılan elektrik dolaylı emisyona neden olur.

Çizelge 1'de belirtilen doğrudan emisyon kaynakları içerisinde yer alan yakıt yakma çimento sektöründeki en önemli emisyon kaynağı olarak gösterilmiştir. Klinker kalitesi ve ham maddelerin ısıtılması ise dolaylı emisyon kaynaklarını oluşturmaktadır. Ham maddelerin ve nihai ürünlerin nakliyesi ve çimento öğütme işlemleri CO_2 emisyonlarına en az katkı yapan işlemler olarak tespit edilmiştir.

DÜNYA GENELİNDE ÇİMENTO ÜRETİMİNİN DURUMU VE CO_2 EMİSYONUNA KATKISI

Gelişmekte olan ülkelerde kentleşmeye bağlı olarak enerji, ulaşım, altyapı, rüzgâr santralleri, hidroelektrik barajlar vb. ihtiyaçların artmasına neden olmaktadır. Bu ihtiyaçların düzenli artmasıyla birlikte çimento sektöründe üretimin ve tüketimin artacağı örülmektedir.

Çimento üretimi son on yıllık dönemde dünya genelinde yıllık ortalama 4,1 milyar ton olarak gerçekleşmiştir. 2022 itibarıyla dünya çimento üretiminin %51,1'lik büyük bir payına sahip olan Çin, sektördeki dominant konumunu korumasına rağmen kentleşme ve altyapı yatırımlarının büyük ölçüde tamamlanasıyla çimento üretimi ve tüketimi 21. yüzyılın başlarından itibaren gerileme göstermiştir.

Çimento tüketimi ise 2022'de 4,125 milyar ton olarak gerçekleşmiş ve bu tüketimin yarısından fazlasını Çin oluşturmuştur. Kuzey Amerika, Orta Doğu, Kuzey Afrika ve Güneydoğu Asya gibi bölgelerde çimentoya talepte bir azalma yaşanırken, Moğolistan, Etiyopya ve benzeri ülkelerde çimento talebi önemli ölçüde artış göstermiştir. (STB, 2024)

Dünya genelinde çimento üretimindeki ve tüketimindeki genel artışla birlikte çimento fabrikalarının sayısı da artış göstermektedir. İsviçreli Holcim şirketi, 180 tesisle dünya çapındaki tüm çimento üreticileri arasında en fazla sayıda çimento fabrikasına sahiptir. Çin'in sahibi olduğu China National Building Materials (CNBM) şirketi 94 tesisiyle dünyada ikinci en büyük operasyonel çimento fabrikasına sahiptir. (WEB-2, 2024)

2024 yılı itibariyle dünyanın en büyük çimento üreticileri arasında yer alan şirketlerden Çin merkezli China National Building Materials (CNBM) yıllık 530 milyon metrik ton çimento üretimiyle lider konumdadır. Yine Çin merkezli Anhui Conch yıllık 388 milyon metrik ton çimento üretimiyle ikinci sırada yer alırken, İşviçre merkezli LafargeHolcim yıllık 274 milyon metrik ton çimento üretimiyle üçüncü sırada yer almaktadır. Bunu Almanya merkezli Heidelberg 185,7 milyon metrik ton takip ederken beşinci sırada Çin merkezli China Resources yer almaktadır. Türkiye'de ise, dünya çimento üretiminin yaklaşık %2'sini gerçekleştirerek, Çin hariç tutulduğunda dünya çimento üretiminin %4'ünü karşılamaktadır. Türkiye son yıllarda önemli gelişmeler göstermiş ve dünyanın en büyük 5. çimento üreticisi Avrupa'nın ise lider üreticisi konumuna yükselmiştir. (Dikçal, 2024)

Türkiye çimento sektörü, Türkiye genelinde 25 şirkete ait 56 entegre ve 21 öğütme olmak üzere toplam 77 fabrikada üretim yapmaktadır. Bu şirketler içerisinde yer alan Oyak, Sabancı, Limak ve Medcem yüksek üretim kapasiteleri ile hem iç piyasaya hem dış piyasaya büyük katkı sunmaktadır. Türkiye çimento sektörü, nispeten geç başlamasına rağmen hızlı bir büyüme trendini yakalayarak hem iç talebi karşılamış hem de küresel pazarda önemli bir oyuncu haline gelmiştir. Özellikle 2023 yılında yaşanan deprem sonrasındaki yeniden yapılanma süreçleri nedeniyle çimento üretimi %23,9 artış göstermiş ve 81,5 milyon tona ulaşmıştır. Bu dönemde üretilen çimentonun yaklaşık %16,2'si ihracata yönlendirilmiş olsa da iç satışlardaki %35,1 artış yaşanmıştır. (Dikçal, 2024)

Son yıllarda küresel ısınmasın da etkisiyle enerji yoğun bir sektör olan çimento sektöründe çevresel etkiler ve sürdürülebilirlik konuları önemli gündem konuları haline gelmiştir. Geleceğe yönelik, çimento sektörünün düşük karbonlu üretim hedefiyle büyümeye devam etmesi beklenmektedir. Bu durum hem çevresel sürdürülebilirlik açısından önemlidir hem de sektörün küresel rekabette daha güçlü bir konuma gelmesine katkı sağlayacaktır.

ÇİMENTO ENDÜSTRİSİNDE CO_2 AZALTMA YÖNTEMLERİ

Çimento endüstrisi, küresel ısınmanın en önemli itici güçlerinden biri olan CO_2 emisyonlarına önemli katkılarda bulunmaktadır. Betonun temel bileşeni olan çimento, üretim süreçlerindeki yüksek enerji tüketimi ve kimyasal reaksiyonlar nedeniyle önemli miktarda CO_2 salımı yapmaktadır. Bu nedenle, çimento sektörünün dekarbonizasyonu, sürdürülebilir kalkınma hedefleri doğrultusunda acil bir gereklilik olarak görülmektedir.

Çimento üretiminde karbon emisyonları ve enerjiyle ilgili emisyonları azaltmak için yenilenebilir enerji kullanımının arttırılması, elektrifikasyon ve otonom araçların kullanılması, karbondan arınmış hammadde ve katkıların kullanılması; proses emisyonlarını azaltmak için ise klinker üretim verimliliğinin arttırılması, karbon yakalama-kullanma-depolama sistemlerinin geliştirilmesi, atık ısı kullanımı ve alternatif enerji kaynaklarının kullanımını da dahil olmak üzere çeşitli yollarla mümkün olmaktadır. (Habert vd., 2010)

Çimento endüstrisinde, özellikle fosil yakıt tüketiminden kaynaklanan sera gazı emisyonlarının azaltılması, iklim değişikliğiyle mücadelede kritik bir öncelik olarak belirlenmiştir. Bu doğrultuda çimento üreticileri, hükümetler, sivil toplum kuruluşları ve akademik çevreler iş birliği içinde, sektörün karbon ayak izini küçültmeye yönelik çeşitli stratejiler geliştirmekte ve uygulamaktadır. (Dahanni vd., 2024)

Çimento sektöründen kaynaklanan CO_2 emisyonlarını azaltmak için çeşitli stratejiler kullanılmaktadır. Bu stratejiler şunlardır;

1. Enerji Verimliliğinin Arttırılması:

Çimento üretimi esnasında yanma sistemlerinin geliştirilmesi, ekipmanların optimize edilmesi, atık ısı geri kazanımı gibi farklı kademelerde yapılacak iyileştirmeler enerji verimliliğini artırarak emisyonun azalmasını sağlayabilmektedir. Hammadde taşıma, karıştırma, öğütme ve ayırma gibi çeşitli aşamalarda kullanılan ekipmanların enerji tüketimi hem maliyeti hem de toplam CO_2 emisyonunu etkilemektedir. Mekanik konveyörlerin pnömatik konveyörlere göre daha az enerji tüketmesi, hammadde karıştırmada yerçekimi tipi siloların tercih edilmesi, gelişmiş valsli değirmenlerin kullanımı ve yüksek verimli ayırıcıların tercih edilmesi gibi uygulamalar, çimento üretim sürecinde önemli ölçüde enerji tasarrufu sağlamaktadır. Özellikle, valsli değirmenlerin kullanımıyla geleneksel bilyalı değirmenlere göre ton başına 6-7 kWh enerji tasarrufu sağlanabilmektedir. (Georgiopoulou, (2018)) Öte yandan, bulamaç karıştırma sürecinde kullanılan basınçlı hava sistemlerinin enerji verimliliği düşük olduğundan, bu sistemlerin optimize edilmesiyle de önemli ölçüde enerji tasarrufu potansiyeli bulunmaktadır. Bu bağlamda, çimento endüstrisinde enerji verimliliğini artırmak için ekipman seçimi, proses optimizasyonu ve alternatif enerji kaynaklarının kullanımı gibi farklı stratejiler birlikte değerlendirilmelidir (Sahoo, 2022)

Fırın yüzeyindeki ısı kayıplarını azaltmak için refrakter malzemelerin optimize edilmesi, klinker soğutma sistemlerinde pistonlu ızgaralı soğutucuların tercih edilmesi, ön ısıtıcı/ön kalsinatör sistemlerinin kullanılması ve çok kademeli ön ısıtıcıların tercih edilmesi gibi yaklaşımlar enerji tasarrufuna önemli katkılar sağlamaktadır. Ayrıca, fırın yanma sistemlerinde dolaylı ateşleme, alternatif yakıtların kullanılması ve atık ısıdan enerji üretimi gibi yöntemlerle hem enerji verimliliği artırılmakta hem de karbon emisyonları azaltılmaktadır. Düşük basınçlı siklonların kullanımıyla da gaz fan sistemlerindeki enerji tüketimi azaltılarak toplam enerji verimliliği artırılmaktadır. Bu sayede, çimento üretimi hem daha sürdürülebilir hale gelmekte hem de üretim maliyetleri düşürülmektedir. Çimento üretim sürecinde en yüksek enerji tüketiminin gerçekleştiği öğütme aşaması, enerji verimliliği çalışmalarının odak noktasını oluşturmaktadır. Geleneksel bilyalı değirmenlerin yerini alan valsli değirmenler ve yüksek basınçlı öğütme sistemleri, termal enerji tüketimini azaltarak ve öğütme performansını artırarak önemli ölçüde enerji tasarrufu sağlamaktadır. Öğütme ortamı ve devrelerinin optimize edilmesi, kuru karıştırmalı öğütme yönteminin kullanılması, simülasyon yöntemleriyle prosesin iyileştirilmesi ve yüksek verimli sınıflandırıcıların kulla-

nılması gibi yaklaşımlar da enerji verimliliğini artırmaya yönelik önemli adımlardır. Gelişmiş proses kontrol sistemleri ve öğütme yardımcı maddelerinin etkin kullanımı ise enerji tasarrufuna ek olarak ürün kalitesini de artırmaktadır. Dik haddeler ve yüksek basınçlı öğütme valsleri gibi teknolojiler hem enerji tüketimini azaltmakta hem de çevresel etkileri minimize etmektedir. Bu sayede, çimento üretimi daha sürdürülebilir ve enerji verimli bir hale getirilmektedir. (Tong, 2018)

2. Alternatif Yakıt Kullanımı

Çimento sektöründe doğal gaz, biyokütle ve atıktan türetilen yakıtlar gibi alternatif yakıtlara geçişle, 2050 yılına kadar emisyonların 2006 seviyelerine göre %18-24 oranında azaltabileceği öngörülmektedir.

Biyokütle, belediye katı atıkları, lastikler, endüstriyel atıklar ve kanalizasyon çamuru gibi çeşitli alternatif yakıtlar, çimento fırınlarında enerji kaynağı olarak değerlendirilerek hem atık yönetimi sorununa çözüm bulunmakta hem de fosil yakıtlara olan bağımlılık azaltılmaktadır. (Sasso, 2024) Bu sayede hem atık yönetimi problemi azalmakta hem de doğal kaynakların korunmasına katkı sağlanmaktadır. Ancak, alternatif yakıtların kullanımı, yakıtın türüne ve ön işlemlerine göre değişen farklı çevresel etkiler yaratabileceğinden dikkatli bir değerlendirme gerektirmektedir. Özellikle, bazı alternatif yakıtlarda bulunan yüksek kükürt, azot, klor veya ağır metal içeriği, diğer hava kirleticilerinin emisyonlarını artırabilmektedir. Bu nedenle, alternatif yakıtların seçimi ve kullanımı, ilgili yönetmeliklere uygunluk, yakıtın kalitesi, ön işleme süreçleri ve emisyon kontrol sistemlerinin etkinliği gibi faktörleri dikkate alarak titizlikle yapılmalıdır. Alternatif yakıtların kullanılmasıyla çimento endüstrisi, hem enerji verimliliğini artırarak maliyetlerini düşürebilir hem de çevresel etkilerini azaltarak sürdürülebilir bir üretim modeline geçiş yapabilir. (Murray, 2008)

3. Klinker Tamamlayıcı Çimentolu Malzemelerin ve Yeni Bağlayıcıların Kullanılması

Çimento endüstrisinde karbon emisyonlarını azaltmak için en etkili yöntemlerden biri, Portland çimentosunun tamamlayıcı çimentolu malzemeler (SCM) ile kısmen veya tamamen değiştirilmesidir. (Abubakar, 2021) SCM'ler, genellikle endüstriyel yan ürünler olan yüksek fırın cürufu, uçucu kül, silis dumanı ve doğal puzolanlar gibi malzemelerdir. Bu malzemeler, çimento karışımlarında klinker ihtiyacını azaltarak, üretim sürecinde harcanan enerjiyi ve dolayısıyla karbon emisyonlarını önemli ölçüde düşürmektedir. Örneğin, yüksek fırın cürufu ve uçucu kül gibi SCM'lerin kullanımı, çimento üretimi sırasında gerekli olan kırma ve yakma işlemlerini azaltarak yakıt tüketimini ve CO_2 emisyonlarını sırasıyla

%43 ve %41'e varan oranlarda azaltabilir. (Bayraktar, 2019) Silis dumanı ise betonun mekanik özelliklerini iyileştirerek daha az çimento kullanılmasına olanak tanımaktadır. Doğal puzolanlar da klinker üretim sürecinde harcanan enerjiyi azaltarak karbon emisyonlarını düşürmektedir. SCM'lerin kullanımıyla elde edilen harmanlanmış çimentolar hem çevresel sürdürülebilirliği artırmakta hem de betonun performansını iyileştirmektedir. Çizelge2'de bazı SCM türleri ve bunların CO_2 emisyonunu azaltımına katkısı yer almaktadır.

Çizelge.2: SCM türleri ve CO_2 emisyonunu azaltma oranları (Yang, vd.,2015)

SCM Türü	Portland çimentosuyla fiyat karşılaştırması	CO_2 emisyonunu azaltma oranı
Granüle öğütülmüş yüksek fırın cürufu	%20- %40 daha uygun	%30-%50
Uçucu küller	%20- %50 daha uygun	%15-%30
Silis dumanı	Daha pahalı	%20-%30
Doğal puzolanlar	30-60% daha uygun	%30-%50

Çimento endüstrisinde, geleneksel Portland çimentosunun (OPC) yüksek karbon ayak izine sahip olması nedeniyle alternatif bağlayıcı malzemeler üzerine yoğunlaşılmıştır. Reaktif belit çimentosu (RBC), kalsiyum sülfoalüminat çimentosu (CSAc), alkali ile aktifleştirilmiş bağlayıcılar (AAB), geopolimer çimento, kalsiyum silikat çimentosu (Solidia çimentosu) ve magnezya çimentoları gibi yeni nesil çimentolar, OPC'ye kıyasla %44-74 oranında daha düşük karbon emisyonları sunmaktadır. Bu çimentolar, üretim süreçlerinde daha düşük sıcaklıklar ve daha az enerji tüketimi gerektirerek, karbon ayak izini önemli ölçüde azaltmaktadır. Örneğin, CSAc, OPC'ye göre %34 daha düşük karbon emisyonuna sahipken, geopolimer çimento ise %80'e varan oranlarda daha düşük emisyonlar sergilemektedir. Yeni nesil çimentolardan bazıları, bu çimentoların yapımında kullanılan hammaddeler, bu çimentoları elde etmek için gerekli olan proses sıcaklığı ve CO_2 emisyonunu azaltım oranı özet halinde Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 3: Yeni nesil çimentoların CO_2 emisyonunu azaltma potansiyelleri (Scrivener, 2018)

Çimento türü	Hammadde	Proses Sıcaklığı	CO_2 Azaltımı
Reaktif Belit Çimentosu (RBC)	Kireçtaşı, marn, kum (Ca/Si oranı 1-2)	1350 °C	~%10
Kalsiyum sülfoaminat çimentosu (CSAC)	Boksit, Kireçtaşı, Kum/Kil, Alçı	1200–1300 °C	%30–40
BYF (Eter çimentosu)	Kireçtaşı, kil ve boksit, kalsiyum sülfat	1250–1350 °C	OPC'den ~%6 daha düşük
Geopolimer	Uçucu kül, atıklar, alkali çözeltiler	Ortam sıcaklığı	~70%
Celitement	Kireçtaşı, marn, kum, cüruf, cam ve uçucu kül (Ca/Si oranı 1–2)	150–200 °C (Hidrotermal)	~%50
Novacem	Magnezyum silikatlar	700 °C, 180 bar	>%100
TecEco	Magnezyum karbonat + OPC + Uçucu kül	<450 °C (Tec-fırın)	>%100
Solidia çimentosu	Kireçtaşı, tebeşir, kil, kum (Ca/Si oranı 1–1,5)	1200 °C	~%70

Bu çimentolar, endüstriyel atıkların değerlendirilmesi yoluyla sürdürülebilirliği artırmakta ve betonun performansını iyileştirmektedir. Özellikle, magnezyum silikat bazlı çimentolar, karbonatlaşma özelliği sayesinde atmosferdeki CO_2'yi hapsederek negatif karbon emisyonuna katkı sağlamaktadır. Bu yenilikçi çimentoların kullanımının artmasıyla beraber çimento endüstrisinin karbon nötrleşme hedeflerine ulaşmasında önemli miktarda yol katedileceği düşünülmektedir. (Morrison, 2016).

4. Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Kullanılması

Çimento üretimi, yüksek enerji tüketimi nedeniyle önemli miktarda karbon emisyonuna yol açan bir endüstridir. Bu durum, iklim değişikliğiyle mücadelede sektörün önemli bir dönüşüm geçirmesini gerektirmektedir. (Belaïd, 2022) Fosil yakıtlardan yenilenebilir enerji kaynaklarına geçiş, çimento endüstrisinin karbon

ayak izini önemli ölçüde azaltmak için kritik bir adımdır. Güneş, rüzgâr, jeotermal ve biyokütle gibi yenilenebilir enerji kaynakları, çimento üretim süreçlerinde kullanılan hem termal hem de elektrik enerjisi ihtiyacını karşılayabilecek potansiyele sahiptir. Bu sayede hem karbon emisyonları azaltılabilir hem de enerji güvenliği artırılarak sürdürülebilir bir üretim modeli oluşturulabilir. (Tsiligiannis vd., 2019) Çimento fabrikalarında elektrikli ekipmanların çalıştırılması, hammadde öğütme ve klinker üretimi gibi süreçlerde yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması, sektörün karbon ayak izini önemli ölçüde düşürülebilmektedir. Özellikle, klinker üretim aşamasında kullanılan yüksek sıcaklıklı fırınlarda biyokütle, güneş enerjisi veya jeotermal enerji gibi alternatif ısı kaynaklarının kullanılması, fosil yakıt tüketimini azaltarak ve karbon emisyonlarını düşürmektedir. Ayrıca, enerji verimliliği çalışmalarının yanı sıra, enerji depolama sistemlerinin kullanımıyla yenilenebilir enerjinin daha etkin kullanımı sağlanabilmektedir. Çimento endüstrisinin karbon nötrleşme hedeflerine ulaşabilmesi için, yenilenebilir enerji kaynaklarının yanı sıra, yeni nesil çimento teknolojileri, karbon yakalama ve depolama yöntemleri gibi farklı stratejilerin bir arada kullanılması gerekmektedir. (Kalair vd., 2021)

5. Elektrifikasyon, Dijitalleşme ve Yapay Zekâ, Plazma ve Diğer Teknolojiler

Çimento endüstrisinde karbon emisyonlarını azaltmak için elektrifikasyon ve dijitalleşme gibi yenilikçi teknolojiler büyük önem taşımaktadır. Coolbrook gibi şirketlerin geliştirdiği rotodinamik ısıtıcı (RDH) teknolojisi, çimento fırınlarında elektrik enerjisi kullanarak fosil yakıt tüketimini azaltma potansiyeli sunmaktadır. (Schneider vd., 2023) Dijitalleşme ise büyük veri ve yapay zekâ teknolojileri sayesinde çimento üretim süreçlerinin optimize edilmesini, enerji verimliliğinin artırılmasını ve bakım maliyetlerinin düşürülmesini sağlamaktadır. (Tong vd., 2023) Yapay zekâ algoritmaları, üretim hatlarındaki verileri analiz ederek, olası sorunları önceden tespit etmeye ve üretim süreçlerini iyileştirmeye yardımcı olmaktadır. (Ateş vd., 2021) Plazma teknolojisi ise çimento fırınlarında yüksek sıcaklıklara ulaşmak için kullanılan alternatif bir yöntemdir. Plazma arkı, elektrik enerjisi kullanılarak oluşturulan yüksek sıcaklıklı bir ortamda hammaddelerin işlenmesini sağlamaktadır. (Wu, 2024) Mikrodalga teknolojisi ise hacimsel ısıtma özelliği sayesinde çimento üretiminde enerji tüketimini önemli ölçüde azaltabilmektedir. (Xiao, 2024) Ancak, bu teknolojilerin endüstriyel ölçekte uygulanabilmesi için daha fazla araştırma ve geliştirme çalışması gerekmektedir

6. Karbonun Fiyatlandırılması

Karbon fiyatlandırması, küresel ısınmanın ana nedenlerinden biri olan sera gazı emisyonlarını azaltmak için kullanılan önemli bir ekonomik araçtır. Bu mekanizma, emisyonların bir maliyeti olduğunu belirterek, üreticileri ve tüketicileri daha düşük karbonlu alternatifleri tercih etmeye teşvik etmektedir. Avrupa Birliği Emisyon Ticaret Sistemi (AB ETS) gibi başarılı uygulamalara sahip karbon fiyatlandırma sistemleri, birçok ülke ve bölgede yaygınlaşmaktadır. Çimento endüstrisi, yüksek karbon emisyonları nedeniyle bu sistemlerin sıklıkla kapsamına alınan sektörlerden biridir. Kuzey Amerika'da, özellikle Kaliforniya ve Kanada'da çimentoyu kapsayan emisyon ticaret sistemleri bulunmaktadır. Karbon fiyatlandırması, emisyonları azaltmada önemli bir kısıtlayıcı olmasının yanı sıra temiz teknolojilere yapılan yatırımları teşvik etmek ve iklim değişikliğiyle mücadele için gerekli finansmanın oluşmasını sağlamaktadır. (Liu vd., 2016)

7. Karbon Yakalama ve Depolama (KYD) Teknolojilerinden Faydalanma

Karbon yakalama ve depolama (KYD) teknolojisi, iklim değişikliğiyle mücadelede önemli bir rol oynayan, endüstriyel süreçlerden kaynaklanan CO_2 emisyonlarını azaltmayı hedefleyen bir yöntemdir. Bu teknoloji, fosil yakıtlı enerji üretimi ve çimento üretimi gibi yüksek emisyonlu sektörlerde, CO_2'nin atmosfere salınmadan önce yakalanarak yeraltı depolarında veya diğer endüstriyel süreçlerde kullanılmasını sağlamaktadır. (M.T., 2022) Yüksek CO_2 emisyonuna sahip çimento sektöründe KYD teknolojilerinin üretim tesislerine entegre edilmesi, sektörün karbon ayak izini önemli ölçüde azaltmak için potansiyel bir çözüm sunmaktadır. KYD teknolojilerin endüstriyel ölçekte uygulanması için daha fazla araştırma ve çalışma yapılması gerekmektedir. Bu nedenle sektörün önde gelen şirketleri tarafından yapılan yatırımlar ve pilot çalışmalar, KYD teknolojilerinin teknik fizibilitesini çalışmalarını oluşturmaktadır. Örneğin, Danimarka'daki Aalborg Portland çimento fabrikasında gerçekleştirilen ConsesCUS projesi, KYD teknolojilerinin çimento üretimine entegre edilmesi konusunda önemli bir adım olarak değerlendirilmektedir. Bu gibi projeler, hem karbon yakalamanın teknik detaylarını hem de yakalanan CO_2'nin depolanması veya yeniden kullanılması konularında önemli bilgiler sunmaktadır. (WEB-3, 2024)

Karbon yakalama ve depolama (KYD) teknolojisi, çimento endüstrisi gibi yüksek karbon emisyonlu sektörlerde önemli bir azaltım potansiyeli sunmasına rağmen, yaygınlaşması için aşılması gereken önemli engeller bulunmaktadır. KYD teknolojilerinin yüksek maliyeti, kamuoyunda yetersiz bilgi ve farkındalık,

güvenli depolama alanlarının sınırlı olması ve ilgili altyapı eksikliği gibi sorunlarla karşı karşıya olması bu teknolojinin yaygınlaşmasını yavaşlatmaktadır. Ayrıca, KYD teknolojilerinin geliştirilmesi ve uygulanması için gerekli olan mali, politik ve teknolojik desteklerin yetersizliği de önemli bir engel oluşturmaktadır. Çimento endüstrisinin karbon nötrleşme hedeflerine ulaşabilmesi için, KYD teknolojilerine yönelik Ar-Ge çalışmalarının hızlandırılması, devlet ve özel sektör iş birliğiyle finansman kaynaklarının artırılması ve kamuoyunun bu teknolojiler hakkında bilinçlendirilmesi gerekmektedir. Bu sayede, KYD teknolojileri, çimento endüstrisinde sürdürülebilir bir geleceğe geçiş için kritik bir araç haline gelebilir. (Zia, 2024)

ÇİMENTO ENDÜSTRİSİNDE KARBONSUZLAŞMAYA YÖNELİK YOL HARİTALARININ KARŞILAŞTIRILMASI

Çimento endüstrisinin coğrafi dağılımındaki heterojenlik, ülkeler ve bölgeler arasında farklılık gösteren düşük karbonlu kalkınma planlarına yol açmıştır. Bu durum, her bölgenin kendine özgü karbon nötr yol haritaları geliştirmesini zorunlu kılmaktadır. Küresel Çimento ve Beton Birliği (GCCA), Avrupa Çimento Birliği (ECA-CEMBUREAU), Birleşik Krallık Maden Ürünleri Birliği (MPA) ve Alman Çimento Birliği (VZD) gibi önemli endüstri birlikleri tarafından yayınlanan yol haritaları, bu alanda önemli referans noktaları oluşturmaktadır. Bu bölümde, söz konusu yol haritaları ile Türkiye'nin yayınladığı düşük karbonlu yol haritası karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Global Çimento ve Beton Endüstrisi Birliği (GCCA) verilerine göre, çimento üretimi küresel sera gazı emisyonlarının önemli bir bölümünü oluşturmaktadır. Sektör, bu durumun farkında olarak, 2050 yılına kadar net sıfır karbon emisyonu hedefi doğrultusunda önemli adımlar atmaktadır. GCCA, öncelikli olarak çimento üretim sürecindeki karbon emisyonlarını azaltmaya odaklanarak, enerji verimliliğini artırma ve alternatif yakıt kullanımını teşvik etme stratejileri benimsemiştir. 2030 yılına kadar CO_2 emisyonlarını yüzde 25 oranında azaltma taahhüdü, sektörün bu konudaki kararlılığını göstermektedir. Bu taahhüt, dünya genelinde çimento endüstrisinin büyük bir kısmını temsil eden GCCA üyeleri tarafından desteklenmekte ve Paris Anlaşması'nın 1,5°C sıcaklık artışı hedefi ile uyumlu hale getirilmektedir. Alternatif yakıtların kullanımındaki artış ve enerji verimliliğindeki iyileşmelerin yanı sıra, karbon yakalama ve depolama (CCUS) teknolojilerinin toplam emisyon azaltımında önemli bir rol oynayacağı öngörülmektedir. (GCCA, 2021)

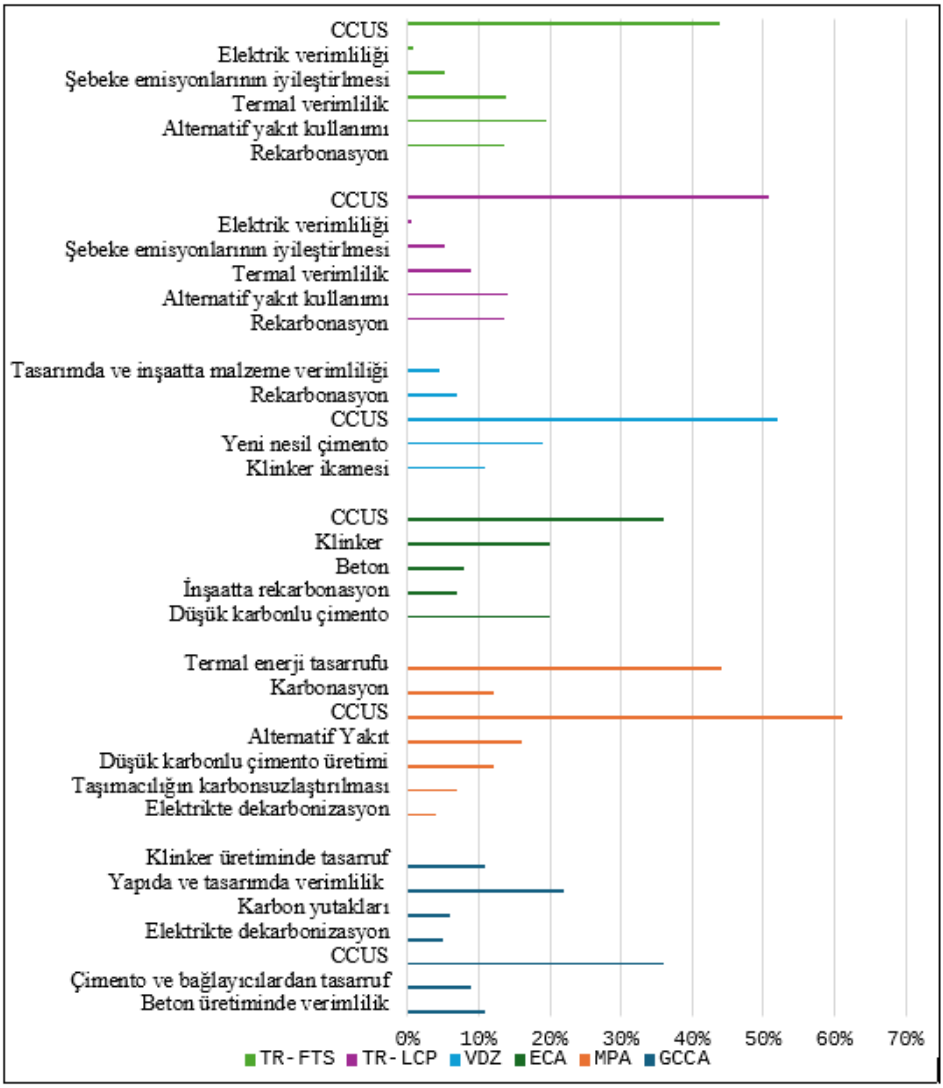
Avrupa Çimento Birliği (ECA-CEMBUREAU) tarafından hazırlanan yol haritası, çimento ve beton değer zincirinde net sıfır emisyon hedefinin gerçekleştirilmesi için kapsamlı bir strateji sunmaktadır. Bu strateji, inşaat verimliliği, karbon tutma (rekarbonasyon), beton ve çimento üretim süreçlerindeki verimlilik artışı ve CCUS teknolojilerinin entegrasyonu gibi çok yönlü bir yaklaşım benimsemektedir. Özellikle CCUS teknolojileri, ECA-CEMBUREAU'nun yol haritasında, sektörün karbon ayak izini önemli ölçüde azaltarak net sıfır emisyon hedeflerine ulaşmasında kritik bir rol oynayacağı vurgulanmaktadır. Bu kapsamlı yol haritası, çimento endüstrisinin sürdürülebilirlik dönüşümünde önemli bir dönüm noktası olarak değerlendirilebilir. (Cembureau, 2020)

Birleşik Krallık, 2050 net sıfır emisyon hedefini gerçekleştirmek amacıyla kapsamlı bir strateji benimsemiştir. Bu strateji, enerji verimliliği, elektrifikasyon ve yeşil hidrojen gibi düşük karbonlu teknolojilerin yanı sıra CCUS gibi yenilikçi çözümlerin geliştirilmesine ve yaygınlaştırılmasına odaklanmaktadır. Ülkenin yayınladığı yol haritası, termal verimlilik artışı ve karbon tutma (rekarbonasyon) gibi geleneksel yöntemlerle birlikte, toplam emisyonlarda en büyük azaltım potansiyelinin karbon yakalama ve depolama teknolojilerinde olduğuna işaret etmektedir. Bu veriler, Birleşik Krallık'ın karbon nötrleşme hedeflerine ulaşmak için CCUS teknolojilerine verdiği önemi ve bu alandaki yatırımların gelecekteki enerji sisteminde oynayacağı kritik rolü göstermektedir. (MPA, 2020)

Almanya Çimento Birliği (VDZ) tarafından hazırlanan yol haritası, çimento ve beton değer zincirinde net sıfır emisyon hedefinin gerçekleştirilmesi için kapsamlı bir strateji sunmaktadır. Bu strateji, inşaat sektöründe verimliliğin artırılması, karbon tutma (rekarbonasyon) mekanizmalarının geliştirilmesi, beton ve çimento üretim süreçlerindeki enerji verimliliğinin optimize edilmesi ve CCUS teknolojilerinin entegrasyonu gibi çok yönlü bir yaklaşım benimsemektedir. Bu sayede, çimento endüstrisinin sürdürülebilirlik dönüşümünde önemli bir adım atılmış ve sektörün karbon ayak izini önemli ölçüde azaltma potansiyeli ortaya konmuştur. (VZD, 2021)

Türkiye çimento sektörünün karbon emisyonlarını azaltma potansiyelini değerlendirmek amacıyla, 'optimal senaryo' ve 'agresif senaryo' olmak üzere iki farklı teknolojik dönüşüm senaryosu incelenmiştir. Optimal senaryoda, Avrupa Birliği'ndeki karbon fiyatlarına göre daha düşük bir maliyetle karbon azaltıcı teknolojilere yatırım yapılabileceği varsayımı altında, 2053 yılına kadar çimento üretiminden kaynaklanan toplam karbon emisyonlarının yaklaşık 6,09 milyon ton CO_2 seviyesine düşürülebileceği öngörülmektedir. Daha iddialı bir yaklaşım benimseyen agresif senaryoda ise, Türkiye'deki karbon fiyatlarının Avrupa Birliği seviyesine çıkarılması ve bu sayede daha kapsamlı emisyon azaltım önlemlerinin

alınması durumunda, 2053 yılına kadar emisyonların %96,5 oranında azaltılabileceği tahmin edilmektedir. (TÜBİTAK, 2023) Şekil 2'de çimento ve beton endüstrisinde çeşitli bölgelerin ve Türkiye'nin net sıfır emisyon yol haritalarında (GCCA, 2022; MPA, 2020; ECA, 2021; VDZ, 2020a TR LCP, 2023 ve TR-FTS, 2023) yer alan emisyon azaltım yöntemlerinin CO_2 emisyonunu azaltma oranlarını gösterilmektedir.



Şekil 2: Çimento sektöründe nötr karbon yol haritalarında emisyon azaltım stratejilerinin CO_2 emisyonu azaltımına katkısı (Dikçal, 2024)

Türkiye'nin 2053 net sıfır emisyon hedefi doğrultusunda çimento sektöründe gerçekleştirilen çalışmalar, farklı senaryolar altında incelenmiştir. LCP senaryosu, elektrik verimliliği, yakıt değişimi ve termal verimlilik gibi önlemlerle, WoM senaryosuna kıyasla %23,7 oranında daha fazla emisyon azaltımı sağlamıştır. CCUS teknolojisi, LCP senaryosunda emisyonları 51,5 milyon ton azaltarak önemli bir katkı sağlamış ve WoM senaryosuna göre toplam emisyon azaltımını %93,2'ye çıkarmıştır. FTS senaryosu ise, şebeke iyileştirmeleri, rekarbonasyon, alternatif yakıtlar ve hidrojen kullanımı gibi çeşitli önlemlerle, CCUS teknolojisi olmadan bile 42,2 milyon tonluk bir emisyon azaltımı hedeflemektedir. Bu bulgular, Türkiye'nin çimento sektöründe karbon emisyonlarını azaltma yönündeki çabalarının etkili olduğunu ve farklı teknolojik ve yönetimsel önlemlerle önemli ölçüde emisyon azaltımı sağlanabileceğini göstermektedir. Özellikle CCUS teknolojisinin, her iki senaryoda da emisyon azaltımında kritik bir rol oynayacağı vurgulanmaktadır.

CCUS teknolojisinin yaygınlaştırılmasıyla birlikte, WoM senaryosuna göre 39,2 milyon ton (%43,9) ilave emisyon azaltımı sağlaması beklenmektedir. FTS senaryosunun 2053 yılında WoM senaryosuna kıyasla %96,7 oranında azaltım sağlanabileceğini öngörmektedir.

Bu yol haritaları baz alındığında, CCUS teknolojilerinin CO_2 emisyonlarının azaltılmasında ana rolü oynayacağı konusunda fikir birliği olduğu görülmektedir. Bu nedenle çimento sektöründe CCUS/CSS teknolojisi üzerinde yoğun araştırma süreci devam etmektedir. (Dikçal, 2024)

DÜNYA VE TÜRKİYE'DEKİ ÇİMENTO FABRİKALARININ KARBONSUZLAŞMAYA YÖNELİK STRATEJİLERİNİN VE EYLEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

Dünya ve Türkiye'de çimento sektörü, karbon emisyonlarını azaltmak için çeşitli stratejiler ve inovasyonlar geliştirmektedir. Bu stratejiler, klinker/çimento oranını düşürmek için mineral katkılar gibi alternatif malzemelerin kullanımı, biyokütle kaynaklı yakıtlarla klinker üretiminin sağlanması, düşük karbon ayak izine sahip alternatif klinker teknolojilerinin geliştirilmesi, karbon yakalama, kullanım ve depolama teknolojilerinin entegrasyonu ve yenilenebilir enerji kaynaklarıyla elektrik üretimi yoluyla klinker üretim süreçlerinin elektrifikasyonu gibi farklı eksenlerde toplanmaktadır.

Çizelge 4, bu stratejilerin Dünya ve Türkiye özelindeki hazırlık düzeylerini karşılaştırmalı olarak sunmaktadır.

Çizelge 4: Çimento sektöründe CO_2 emisyonunu azaltma stratejilerinin Dünya ve Türkiye'deki hazırlık seviyeleri (TÜBİTAK, 2023)

Yöntem	Emisyon Azaltım Stratejisi	Teknoloji Hazırlık Seviyesi (1-10)	
		Dünya	Türkiye
Klinker, çimento ve beton üretim süreçlerinde yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması	Güneş enerji santrali entegre edilmiş çimento fabrikası	9	9
	Yüksek sıcaklıklı termik güneş reaktörü kullanılarak kalsinasyon	5	3
	Güneş enerjisinden klinker üretimi	4	3
	Hidrojen yakıtı ile çimento üretimi	5	3
	Biyokütle ile çimento üretimi	6-8	6-8
	Elektrikli iş makinelerinin çimento üretiminde kullanılması	8-9	3-5
Klinker ve çimento üretim proseslerinin verimliliğini artırmada enerji tasarrufu	Yeni nesil enerji verimli değirmenler kullanımı	7	7
	Plazma, mikrodalga gibi üretim tekniklerinin geliştirilmesi neticesinde oluşan atık ısıların kullanılması	1	1
	Piezoelektrik sensör kullanımı ile otoyollardan elektrik üretimi	3	-
	Elektrikli taşıt kullanımı	7	7
	Yapay zekâ ve bulanık mantık tabanlı otonom üretim sistemlerinin geliştirilmesi	8	7
Klinker sürecinin iyileştirilmesi yoluyla emisyon azaltımı	Mikroalglerin fotosentez kabiliyetleri sayesinde baca gazından karbon tutulması	7	6
	Sıcak iklimlerde baca gazlarından CO2 yakalamak için alg kullanımı	6	-
	Kalsiyum döngü prosesi kullanarak CO2 yakalama	7	-
	Oksi-yanma teknolojisi	7	-
	Endüstriyel ölçekte yeşil hidrojen ve karbonsuzlaştırma projesi, oksi-yanma ve yenilenebilir enerji kaynağı kullanımı	7	-
Beton ve çimento bağlayıcılı malzemelerin üretiminin iyileştirilmesi ve yeni süreçlerin geliştirilmesi	Enerji tasarruflu ve düşük karbonlu rankinite klinkerleri çimentonun kompozisyon tasarımı ve pilot çalışması	7	-
	Düşük karbonlu, farklı katkılar içeren çimentonun sürdürülebilirliğinin değerlendirilmesi ve pilot üretimi	8	8
	CO_2 ile beton kürleme	9	-
	Biyokütle karbonizasyonu yoluyla atmosferik karbon giderme ve karbon tutma için potansiyellerin, yan etkilerin ve sinerji etkilerinin analizi	4	-
	Karbon yakalama ve depolama ile biyoenerji	8	-
	Atıkların çok yüksek oranda değerlendirilmesi	5	5
	Düşük klinkerli çimento	9	9
	Alternatif çimentoların yenilikçi üretim yöntemiyle elde edilmesi	8	8

Alkali ile aktive edilmiş bağlayıcılar	8	9
Yüksek oranda mineral katkı içeren çevreci beton uygulamaları	5	9

Çizelge 4, Dünya ve Türkiye çimento sektörlerinin karbon emisyonlarını azaltma yönündeki çabalarının benzer bir seyir izlediğini göstermektedir. Bu paralellik, küresel ölçekte belirlenen karbon emisyonu azaltım hedeflerinin ve stratejilerinin, sektördeki tüm oyuncular tarafından benimsenmesinden kaynaklanmaktadır. Özellikle Holcim, HeidelbergCement ve CNBM gibi dünya devi çimento üreticileri hem kendi tesislerinde hem de sektör genelinde uygulanabilir emisyon azaltım stratejileri geliştirerek sürdürülebilirlik alanında öncü bir rol üstlenmektedir. Bu şirketler, sektörde yeşil dönüşümü hızlandırmak amacıyla kapsamlı ve yenilikçi stratejiler belirleyerek bu stratejileri uygulamaya koymaktadırlar.

Sektör lideri çimento üreticileri, 2050 yılına kadar karbon ayak izlerini önemli ölçüde azaltmayı hedefleyerek, sürdürülebilir üretim süreçlerine geçiş yapmaktadır. Bu şirketler, alternatif yakıtlar, alternatif hammaddeler ve atık malzemelerin değerlendirilmesi gibi çeşitli stratejilerle birlikte, enerji verimliliğini artırıcı teknolojiler, elektrifikasyon ve otomasyon sistemleri gibi yenilikçi çözümler benimsemektedirler. Özellikle karbon yakalama ve depolama (KYD) teknolojilerine yapılan yatırımlar, sektörün karbon emisyonlarını %95 oranında azaltma hedefini gerçekleştirmede kritik bir rol oynayacağı düşünülmektedir. Çizelge 5'te, bu şirketlerin 2024 yılına kadar gerçekleştirdikleri spesifik adımlar ve bu adımların karbon emisyonlarını azaltmadaki etkileri detaylı bir şekilde sunulmaktadır.

Çizelge 5: Dünyadaki büyük çimento fabrikaları ve CO_2 emisyonunu azaltma faaliyetleri (Dikçal, 2024)

Çimento Fabrikası	CO_2 Azaltma Stratejileri	2024 yılına kadar yapılan net sıfır emisyon faaliyetleri
China National Building Material Co. Ltd (CNBM)	Emisyon miktarları, küresel ısınma ve iklim değişikliğinin şirket üzerinde oluşturacağı risklerin, fırsatların ve müdahalelerin yıllık bazda belirlenmesi	2020'den itibaren karbon emisyon verilerinin kendi kendine araştırılması ve envanterinin çıkarılması, karbon emisyon veri istatistik sisteminin doldurulmasının organize edilmesi ve kademeli olarak bir karbon emisyon veri tabanının oluşturulması
	Yeşil fabrikaların, yeşil madenlerin ve ekolojik fabrikaların inşasının aktif olarak teşvik edilmesi ve çevre koruma teknolojilerinin araştırma ve geliştirme, yaygınlaştırma ve uygulama yatırımlarının artırılması	Kapasite azaltımı ve karbon azaltımı
	Hidroelektrik, rüzgâr enerjisi ve fotovoltaik güneş enerjisi gibi yenilenebilir enerji kullanımının artırılması	Yüksek verimli klinker sinterleme ekipmanı ve teknik uygulama
	Ürünlerin ikame riskinin ve diğer malzemelerin rekabet avantajlarının ve dezavantajlarının analiz edilmesi, yeşil	Yüksek verimli öğütme ekipmanı ve teknoloji uygulaması
		Alternatif hammadde/yakıt teknolojisi uygulama
		Düşük karbonlu klinker teknolojisinin uygulanması

	ürünlerin araştırma ve geliştirme mekanizmasının iyileştirilmesi ve atık ısıdan enerji üretimi, kapsamlı enerji tasarrufu ve tüketim azaltıcı teknolojik dönüşüm, alternatif yakıtların ve alternatif malzemelerin kullanımı vb. dahil olmak üzere çevre koruma teknolojilerinin uygulanması Düşük karbonlu teknolojilere yatırım yapılmasını	"Sıfır karbon" maden teknolojisinin uygulanmasının teşvik edilmesi Yeni enerji teknolojisi karbon yakalama ve arıtma teknolojisi pilotu Çimento üretim hattında tehlikeli atık, evsel katı atık ve evsel çamurun birlikte bertarafının yapılması Dijital teknolojinin uygulanmasına yönelik araştırmaların güçlendirilmesi Yenilenebilir enerji tesislerin inşa edilmesi ve emisyonun azaltılması Düşük karbon ve düşük nitrojenli çimento pişirimi için teknoloji ve ekipmanların kullanımının artırılması

Çimento Fabrikası	CO_2 Azaltma Stratejileri	2024 yılına kadar yapılan net sıfır emisyon faaliyetleri
China National Building Material Co. Ltd (CNBM)	Enerji verimliliğinin artırılması, yakıt ikamesi, güç optimizasyonu, ham malzeme ikamesi ve düşük karbonlu çimento geliştirme, CCUS aracılığıyla karbonun tutulması, kullanımı ve depolanması	Akıllı bir üretim ekolojik platformunun kurulması yaşam döngüsü için dijital bir yönetim ve kontrol platformunun kurulması
Laferge Holcim	Klinker kullanımının azaltılması Kireç taşı bazlı klinkerin değiştirilmesi Alternatif ham madde ve yakıt kullanımı Alternatif yakıt olarak hidrojen kullanılması 2030 itibariyle CCUS teknolojisin etkin kullanımı ECOplanet zero tamamen dekarbonize çimento üretimi için projelerin yürütülmesi Karbondan arındırılmış elektrik kullanımı Enerjinin verimli kullanılması 2018 baz alındığında 2030 yılına kadar sera gazı emisyonunu malzemenin tonu başına %26 azaltılması Yakıt ve enerjiyle ilgili dolaylı emisyonlarda %20, taşıma ve dağıtımdan kaynaklanan emisyonlarda %24 sera gazı azaltılması	Geniş ve yenilikçi bakış açısıyla yeni hammaddelerin kullanımı Biyokütleden belediye atıklarına kadar yaşam döngülerinin sonundaki malzemeleri kullanılmasıyla Geocycle alternatif yakıtlara geçiş yapılması İnşaat kalıntılarının geri dönüştürülmesi Atıklardan katkı malzemesi yapılması Otonom elektrikli araçlarla taşıma ve dağıtım yapılması Tesis içi elektriğin ısı geri kazanımından elde edilmesi Güneş, rüzgâr ve hidro kaynaklardan atık ısı geri kazanım sistemlerine yenilenebilir enerji kullanılması Gelişmiş teknolojiler kullanarak her yıl malzeme agregaların ve imal edilmiş toprakların geri kazanılması ve geri dönüştürülmesi CCUS projelerinin yatırım yapılması 3D baskıyla malzeme azaltımı yapılmasıyla dolaylı emisyon azaltılması

Türkiye'deki büyük çimento fabrikaları da bu global ölçekteki stratejileri benimsemiş durumdadır. Türkiye'deki çimento fabrikaları CO_2 emisyonunu azaltmak amacıyla atıkların yakılmasıyla enerji elde edilmesi ve atıklardan hammadde eldesi gibi yöntemleri daha fazla tercih etmekle beraber yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması, klinkerdeki alçıtaşının azaltılması veya eşdeğer ürünlerle

ikamesi, tesislerdeki enerji verimliliğinin artırılması gibi yöntemleri kullanılmaktadır. Çizelge 6'da Türkiye'deki büyük çimento şirketlerinin CO_2 emisyonunu azaltmaya yönelik stratejileri ve eylemleri yer almaktadır.

Çizelge 6: Türkiye'deki büyük çimento tesisleri ve emisyon azaltma stratejileri (Dikçal, 2024)

Çimento Fabrikası	CO_2 azaltma stratejileri	2024 yılına kadar yapılan net sıfır emisyon faaliyetleri
Oyak/TCC	Alternatif yakıt ve ham madde kullanımına geçiş yapılması Klinker malzeme oranının azaltılması Termal enerji verimliliği Yenilenebilir enerji kaynakları kullanımının artırılması Atık geri dönüşüm tesislerinin artırılarak elektrik üretiminin sağlanması Düşük karbonlu çimento üretimi için katkılı ham madde kullanımı yapılması CSS ve CSUS konularında AR-GE ve inovasyon çalışmalarının yapılması	Atık besleme sistemlerin daha ileri seviyelere taşınması Çevreci üniteler kurmak üzere önemli yatırımlar gerçekleştirilmesi Alternatif yakıt kullanım oranını da önemli ölçüde artırılması Alternatif yakıt hazırlama, otomatik besleme ve proses yanma operasyonlarında uygulama süreçleri hayata geçirilmesi Enerji tasarrufu sağlayan ve verimliliği artıran projelere yatırım yapılması Yeni nesil teknolojilere entegrasyon yapılması
Akçansa (Sabancı/ Heidelberg	Doğrudan ve dolaylı yoldan CO_2 emisyonlarının azaltılması Yenilenebilir enerji kaynaklarına geçiş ve enerji verimliliği Ürünlere sürdürülebilirlik statüsü kazandırılması Klinker üretiminde yenilikler, inşaat kalıntılarının yeniden üretim sürecine katma kriterleri, mikroalglerden ek yakıt üretimi ve CO_2 tutucu olarak kullanımını araştırılması	Klinker üretiminde yapay zekâ kullanımı 2019 yılından itibaren ürün başına 69 kg CO_2 emisyon azaltımı Özel karışımlı çimentolar (yeşil şap) sayesinde %35'e kadar daha düşük CO_2 emisyonu 360 bin ton alternatif hammadde kullanımı 267.000 ton alternatif yakıt kullanımı 4300 ton öz atıktan geri dönüşüm ve enerji kazanımı 297 bin ton CO_2 eşdeğeri tasarruf 237,8 milyon iklim ve çevre yatırımı 22,4 milyon TL sürdürülebilirlik amaçlı inovasyon ve Ar-Ge yatırımı 733 bin MWh enerji tedariği
Vicat	Atıklardan alternatif yakıt eldesi Emisyon azaltıcı ve enerji verimliliğini artırıcı yeni teknolojilerin entegrasyonu veya geliştirilmesi Enerji dönüşümü projelerinin artırılması, iş birliği sağlanması Geleneksel çimentonun tüm doğal özelliklerine ve uygulamalarına uyan ancak negatif karbon ayak izine sahip, yani net emisyon seviyesi 0 kg eşdeğer CO_2'den düşük olan bir bağlayıcı geliştirilmesi	420.000 metrik ton CO_2 emisyonu önlenmesi Yakıt ikame oranı: Grup genelinde 2021'de %26,2'den 2022'de %28,1'e (860.000 metrik ton kömür yakmamaya eşdeğer), Avrupa'da %66,0'a yükselmesi Klinker içeriği: 2021'de %78,9'dan 2022'de %77,5'e düşürülmesi Tüketilen elektrik enerjisinin %5'i yenilenebilir öz üretim (hidro, fotovoltaik, atık ısı) yoluyla elde edilmesi Değer zincirinin karbondan arındırılması için yüksek kaliteli, %100 sürdürülebilir, standartlara uygun ürün ve hizmet teklifi Düşük karbonlu beton ve çimento üretimi (DECA2) Teslimat için %97 daha az CO_2 emisyonu yapan Oxygène hibrit transmikserlerin kullanılması

Çimko	En az %25 oranında fosil yakıt kullanımının azaltılması Alternatif ham madde kullanımının artırılması Emisyonu kontrol altında tutabilmek için emisyon ölçümlerinin sürekli yapılması Enerji verimliliğinin artırılması Tesis etrafında ağaçlandırma miktarının artırılması Tüm makine ve ekipmanların enerji verimliliğinin artırılması Elektrik ve doğal gazın gereğinden fazla kullanımının azaltılması	Yakıt olarak kullanılan petrokok ve linyit gibi birincil fosil kaynakların tüketimini azaltarak, ilâve CO_2 ve CH_4 emisyonunu önlenmesi Uzman otomatik kontrol sistemi (expert) yatırımı ile 1,3 kWh/ ton çimento, statik enerji deşarj cihazı yatırımı ile de 1,1 kWh/ ton çimento olmak üzere toplam 2,4 kWh/ton çimentodan enerji tasarrufu yapılması Soğutma kulesinde fan kanatları verimli kanatlar ile değiştirilmesiyle birlikte %25 enerjiden tasarruf sağlanması Farin üretiminde enerji tasarrufu sağlanması Atık ısıdan enerji üretim tesisi kurulması Yeni hammadde katkılarıyla klinker kullanım oranının düşürülmesi Atıktan türetilmiş yakıt üretim tesislerinin kurulması
Limak	Enerji tüketiminin azaltılarak enerji verimliliğinin artırılması Fosil yakıtların kullanımının azaltılması Alternatif yakıtların kullanımının artırılması Çimento üretimindeki klinker miktarının azaltılması	Kalsinatörlü döner fırınlar aracılığıyla düşük emisyonlu çimento üretilmesi Düşük karbon emisyonlu yeni bir çimento türü (CEM PLUS+) geliştirilmesi Emisyon yoğunluğunun %34 azaltılması Karbon emisyonu azaltımının sertifikalandırılması
Çimentaş/ Cementir Holding	Fosil yakıtların alternatif yakıtlarla değiştirilme oranın artırılması Alternatif yakıt kullanımını mevcut %40'tan %70'in üzerine çıkarmak için fırının yenilenmesi; bazı tesislerde doğal gaz ve biyogaz kullanımının artırılması Tesislere doğal gaz hattı ve fırınlara çoklu yakıtlı brülörlerin montajı Enerji geri kazanımı süreçlerinin daha fazla geliştirilmesi Çimentodaki klinker oranının azaltılması	Klinkerin uçucu kül ve cüruf gibi alternatif karbonsuzlaştırılmış mineral katkı maddeleri ile değiştirilmesi Düşük karbonlu" çimento olan FUTURECEM ®'in geliştirilmesi yoluyla klinker içeriğinin gri çimento için %63'e ve beyaz çimento için %78'e düşürülmesi CO_2 emisyonlarının azaltılmasında karbon yakalama, kullanım ve depolama gibi yeni teknolojilerin potansiyelinin araştırılması Atıklardan enerji elde edilmesi
Nuh Çimento	Düşük klinker içeriğine sahip ürün üretimi Atık ısı geri kazanım tesisi Hidroelektrikli santral ile yenilenebilir enerji üretimi Enerji verimliliği ile enerji tasarrufu Karbon yakalama ve depolama sistemleri ile 2050 net sıfır emisyona ulaşılması Yıllık %2,25 emisyon azaltma stratejileri uygulanması	%23 yenilenebilir enerji kaynağı kullanımı Fırınlarda otomasyon sistemine geçilmesiyle enerji tasarrufu sağlanması Alternatif yakıt yakma sistemi kurulması Kaya kamyonlarının elektrikliye dönüştürülmesi %0,6 atıklardan enerji elde edilmesi Klinker oranı yüksek çimento yerine klinker oranı düşük çimento (yeşil ürün) üretiminin artırılması İş makinelerinin dizelden elektrikli araca dönüştürülmesiyle %39-56 oranında emisyonun azaltılması

	Alternatif yakıt hazırlama ve besleme sistemi İki adet RES (Rüzgâr Enerji Santrali) yatırımı	
Göltaş	CO_2 emisyonlarının azaltılması için katkılı çimento tüketiminin teşvik edilmesi Ekipman değişikliği ile yapılacak enerji tasarrufları Döner Fırın-2 soğutma elektro filtresin torbalı filtre sistemine dönüştürülmesi Alternatif yakıt kullanımı kapsamında farklı türde atık beslemelerin yapılması	Atıklardan enerji elde edilmesi Çimento üretiminde klinkerin yerine alternatif maddelerin kullanılması Sürekli emisyon ölçümleriyle emisyon sınır değerlerde tutulması Atık ısı geri kazanım tesisi aracılığıyla 26.012 ton CO_2 emisyonun önlenmesi Çimento üretim süreçlerindeki kırma, yanma ve öğütme tesislerinde daha az enerji tüketen verimli ekipmanlar kullanılması
Traçim	Yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik enerjisi üretimi Atık ısı enerjisinin geri kazanımı için fizibilite çalışmalarının yapılması Alternatif yakıt olarak biyokütle içeriği yüksek olan ek yakıtların tercih edilmesi, Alternatif hammadde kullanım oranının artırarak klinker kullanım oranının azaltılması, Düşük karbon emisyonlu çevreci yeni ürünlerin tercih edilmesi, Proses verimliliğini sürekli takip ederek, iyileşme yatırımlarına devam edilmesi gibi süreçleri hayata geçirilmesi	Atıktan türetilmiş yakıt besleme tesisi kurulumuyla enerji tasarrufu sağlanırken çevresel kirliliğinin azaltılması Döküm kumu, demir koku, cüruf, alüminyum çamurları, yakma tesislerinden çıkan küller ve farklı sektörlerin atıklarından alternatif hammadde ve ek yakıt eldesi
Medcem	Yenilenebilir enerji kaynakları kullanımı Sürdürülebilir malzeme kullanımı Atıklardan alternatif yakıt ve ham madde elde edilmesi Fosil yakıt kullanımını azaltılması	Güneş enerji santrali yatırımlarının artırılması Güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi ve atık geri dönüşümünden toplam 237,328 GJ enerji eldesi (%17 yeşil enerji kullanımı) Düşük klinker/çimento oranına sahip, CO_2 salımında azaltımı başaran "yüksek performanslı çevreci çimento üretilmesi Yüksek verimli elektrik motorları kullanılması

Dünyadaki ve Türkiye'deki çimento fabrikaları emisyon azaltma açısından kıyaslandığında, Dünyanın önde gelen firmaları birçok tesise sahip olmalarından dolayı küresel çapta kapsayıcı bir emisyon azaltma stratejileri belirleyebilmiş, en iyi uygulamaları ve teknolojileri araştırmalar sonucunda bünyesine dahil etmiştir.

CCS/CCUS, yenilikçi çimentolar ve yakıtlar, verimli fırınlar, makineler, değirmenler, otonom ve yapay zekâ kullanımı gibi yeşil dönüşümü destekleyen unsurları ivedilikle benimseyerek uygulama aşamasına geçen çimento fabrikaları amiral gemisi görevini üstlenmiştir.

Türkiye çimento fabrikalarının dünya genelindeki emisyon azaltma yöntemlerini benimsediği ve yerel koşullara uygun yenilikçi çözümler geliştirdiği görülmektedir. Türkiye çimento sektöründe faaliyet gösteren fabrikalar çoğunlukla başta atık ısıdan elektrik üretimi olmak üzere hidroelektrik ve jeotermal enerji gibi yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik üretimi alanında yatırımlar yapmaya başlamıştır.

Lider çok uluslu şirketler ile bölgesel bazda gelişmekte olan pazar liderleri arasındaki farklı önceliklere ve stratejilere rağmen, sektörün sürdürülebilirlik konusundaki kararlılığı, çevresel yönetim ve inovasyona olan bağlılığını göstermektedir. Her iki tarafın da bu süreçte karşılaşacağı zorluklar ve fırsatlar, yerel koşullar ve mevcut teknolojilere bağlı olarak değişiklik gösterecektir.

SONUÇ

Dünyanın önde gelen çimento şirketleri, iklim değişikliğiyle mücadelede aktif rol alarak, yeşil dönüşüm stratejileri benimsemişlerdir. Bu şirketler, çimento üretim süreçlerindeki karbon ayak izini azaltmak için çeşitli yöntemler kullanmaktadır. Bu yöntemler arasında yeşil enerji kaynaklarından elde edilen alternatif yakıtların kullanımı, enerji verimliliği önlemleri, alternatif hammadde kaynaklarının kullanımı, atıkların enerjiye dönüştürülmesi ve karbon yakalama ve depolama teknolojilerine yatırım yapılması gibi sürdürülebilirlik odaklı uygulamalar yer almaktadır. Bu şirketlerin hedefleri arasında, 2050 yılına kadar CO_2 emisyonlarını %95 oranında azaltmak bulunmaktadır. Bu durum, çimento sektörünün sürdürülebilir bir gelecek için önemli adımlar attığını göstermektedir.

Türkiye'deki büyük çimento şirketleri, CO_2 emisyonu azaltmak için yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması, klinkerdeki alçıtaşının azaltılması veya eşdeğer ürünlerle ikamesi, tesislerdeki enerji verimliliğinin artırılması, enerji tasarrufu noktasında lider çimento şirketleriyle benzer bir yol izlemektedir. Farklı olarak Türkiye'deki çimento fabrikaları CO_2 emisyonunu azaltmak amacıyla atıkların yakılmasıyla enerji elde edilmesi ve atıklardan hammadde eldesi gibi yöntemlere daha fazla yönelmiştir.

Sonuç olarak, 2050 net sıfır emisyon hedefine ulaşabilmek için küresel ölçekte tüm çimento fabrikalarının 2030 yılına kadar maliyet ve uygulanabilirlik hızı açısından öncelikli olarak fosil yakıtların kullanımını azaltarak alternatif yakıtların kullanımını artırması gerekmektedir.

Enerji verimliliği sağlayabilmek için sırasıyla atık ısı kullanımı artırması, klinker ikamesini artırarak yeşil çimento dönüşümüne başlaması veya hızlandırması, alternatif enerji kaynaklarına geçiş yaparak elektrifikasyonu artırması, dijitalleşme (otomasyon, yapay zekâ) sürecini hızlandırması, tesis ve makineleri enerji tasarrufu sağlayan yeni sistemlerle ve makinelerle değiştirmesi ve emisyonu azaltabilecek diğer teknolojileri araştırması ve yatırım yapması gerekmektedir.

Uygulanan bu yöntemlerle 2030 yılına kadar belli miktarda azaltılması planlanan CO_2 emisyonu 2050 yılına kadar sıfırlayabilmek için kullanılan yöntemlerin sürekli iyileştirilerek uygulanmaya devam edilmesi, bunun yanında karbon yakalama teknolojisinin devreye alınması gerekmektedir. Böylelikle diğer yöntemlerle yok edilemeyen CO_2 yakalanarak depolanabilir veya kullanılabilir.

Hükümetlerin ise, çimento sektöründe CO_2 emisyonunu azaltmak için çizdiği yol haritalarında belirtilen kaldıraçların, uygulama aşamasında yetersiz kaldığı noktaları tespit etmesi, revizyon yapması, uygulamaları denetlemesi, yetersiz uygulamalarda sektöre yönelik yaptırımları artırması, karbon vergi sistemini uyarlaması gerekmektedir. Bunun yanında araştırmalara destek vermesi, yatırımları teşvik etmesi, finansal destek sağlaması gerekmektedir.

REFERANSLAR

Abubakar, A. M. (2021). Assessment of embodied energy and carbon IV oxide emission of concrete containing corncob ash. *International Journal of Sustainable and Green Energy, 10*(2), 76-84.

Ateş, K. T., Şahin, C., Kuvvetli, Y., Küren, B. A., & Uysal, A. (2021). Sustainable production in cement via artificial intelligence based decision support system: Case study. *Case Studies in Construction Materials, 15*(e00628).

Bayraktar, O. (2019). The possibility of fly ash and blast furnace slag disposal by using these environmental wastes as substitutes in portland cement. *Environ. Monit. Assess., 191*, 560.

Belaïd, F. (2022). How does concrete and cement industry transformation contribute to mitigating climate change challenges? *Resources, Conservation & Recycling Advances, 15*(200084).

Cembureau. (2020). *Cementing the European Green Deal - Reaching climate neutrality along the cement and concrete value chain by 2050.* European Cement Association.

Chatterjee, A. (2018). *Cement Production Technology: Principles and Practice* (Cilt 1st Edition). CRC Press. doi:https://doi.org/10.1201/9780203703335

Dávila, J. G., & Aagesen, M. (2024). How to accelerate CCS deployment in the Cement Industry? Assessing impacts of uncertainties on the business case. *International Journal of Greenhouse Gas Control, 137*(104197).

Dikçal, F. A. (2024). Dünya ve Türkiye'deki Çimento Endüstrisinin CO2 Azaltma Yöntemlerinin Karşılaştırılması. *Yüksek Lisans Tezi*.

Dziejarski, B., Krzyżyńska, R., & Andersson, K. (2023). Current status of carbon capture, utilization, and storage technologies in the global economy: A survey of technical assessment. *Fuel*(127776).

Ellis, L. D., Badel, A. F., Chiang, M. L., Park, R. J.-Y., & Chiang, Y.-M. (2020). Toward electrochemical synthesis of cement-An electrolyzer-based process for decarbonating CaCO3 while producing useful gas streams. *Proc Natl Acad Sci U S A, 117*(20), 12584-12591. doi:doi: 10.1073/pnas.1821673116

Farahiyah, A. R., & Md Maniruzzaman A. Aziz, R. S. (2017). Pollution to solution: Capture and sequestration of carbon dioxide (CO2) and its utilization as a renewable energy source for a sustainable future. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 17*, 112-126.

GCCA. (2021). *Concrete Future - the GCCA 2050 Cement and Concrete Industry Roadmap for Net Zero Concrete.* London : Global Cement and Concrete Association.

Georgiopoulou M., L. G. ((2018)). Life cycle assessment of the use of alternative fuels in cement kilns: a case study. *J. Environ. Manag, 216*, 224-234.

H. Dahanni, A. V. (2024). Life cycle assessment of cement: Are existing data and models relevant to assess the cement industry's climate change mitigation strategies? A literature review. *Construction and Building Materials, 411*(134415). doi:https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134415

Habert, G., Billard, C., Rossi, P., Chen, C., & Roussel, N. (2010). Cement production technology improvement compared to factor 4 objectives. *Cement and Concrete Research, 40*, 820-826.

IEA. (2017). *Energy Technology Perspectives 2017: Catalysing Energy Technology Transformations.* International Energy Agency. doi:https://doi.org/10.1787/energy_tech-2017-en

IEA. (2023). *Cement.* Paris: International Energy Agency. https://www.iea.org/reports/cement-3, Licence: CC BY 4.0 adresinden alındı

Ige, O. E., Vandi, ·. D., & Kallon, V. (2024). Carbon emissions mitigation methods for cement industry using. *Clean Technologies and Environmental Policy, 26*, 579-597. doi:https://doi.org/10.1007/s10098-023-02683-0

IPCC. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Summary for Policymakers Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge Univ. Press.

Kalair A., A. N. (2021). Role of energy storage systems in energy transition from fossil fuels to renewables. *Energy Storage, 3*(135).

Khaiyum, M. Z., Sarker, S., & Kabir, G. (2023). Evaluation of Carbon Emission Factors in the Cement Industry: An Emerging Economy Context. *Sustainability, 15(21)*(15407). doi:https://doi.org/10.3390/su152115407

Liu, X., Fan, Y., & Li, C. (2016). Carbon pricing for low carbon technology diffusion: A survey analysis of China's cement industry. *Energy, 106*, 73-86.

Liu, Z., Ciais, P., Deng, Z., & el at. (2020). Carbon Monitor, a near-real-time daily dataset of global CO2 emission from fossil fuel and cement production. *Scientific Data, 7*(392). doi:https://doi.org/10.1038/s41597-020-00708-7

M.T., G. (2022). Carbon Dioxide Emissions, Capture, Storage and Utilization: Review of Materials, Processes and Technologies. *Progress in Energy and Combustion Science, 89*(100965).

Morrison, J. J.-M. (2016). Magnesium-based cements for CO2 capture and utilisation. *Cement and Concrete Research, 85*, 183–191.

MPA. (2020). *UK Concrete and Cement Industry Roadmap to beyond Net Zero - UK Concrete Is Essential, Sustainable, Protecting People, Innovating, Helping to Tackle Climate Change and Enabling Great Design.* MPA UK Concrete and Cement Industry.

Murray, A. &. (2008). Use of alternative fuels in cement manufacture: analysis of fuel characteristics and feasibility for use in the Chinese cement sector.

Nunes, L. J. (2023). The Rising Threat of Atmospheric CO2: A Review on the Causes, Impacts, and Mitigation Strategies. Environments. *Environments, 10*(4), s. 66. doi:https://doi.org/10.3390/environments10040066, 10(4):66.

Sahoo, N. &. ((2022)). Review on energy conservation and emission reduction approaches for cement industry. *Environmental Development, 44*, 100767.

Sasso, O. R. (2024). Valorization of Biomass and Industrial Wastes as Alternative Fuels for Sustainable Cement Production. *Clean Technol., 6*(2), 1-12.

Schneider, M. H. (2023). The cement plant of tomorrow. *Cement and Concrete Research, 173*(107290).

Scrivener, K. L. (2018). Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO 2 cement-based materials industry. *Cement and Concrete Research, 114*, 2-26.

STB. (2024). *Türkiye Çimento Sektörü için Düşük Karbonlu Yol Haritası.* T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı.

Tomatis, M., Kumar, H., & Jeswani, L. S. (2020). Assessing the environmental sustainability of an emerging energy technology: Solar thermal calcination for cement production. *Science of the Total Environment*(140510), 1-16. doi:https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140510

Tong D, Z. Q. (2018). Current Emissions and Future Mitigation Pathways of Coal-Fired Power Plants in China from 2010 to 2030. *Environ Sci Technol., 52*(21), 12905-12914. doi:doi: 10.1021/acs.est.8b02919

Tong, R., Sui, T., Feng, L., & Li, L. (2023). The digitization work of cement plant in China. *Cement and Concrete Research, 173*(107266).

Tsiligiannis, A., & Tsiliyannis, C. (2019). Renewable energy in cement manufacturing: A quantitative assessment of energy and environmental efficiency of food residue biofuels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 107*, 568-586.

TÜBİTAK. (2023). *Yeşil Büyüme Teknoloji Yol Haritası Çimento Sektörü.* Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu .

Uwasu, M., Hara, K., & Yabar, H. (2014). World cement production and environmental implications. *Environmental Development, 10*(1). doi:DOI:10.1016/j.envdev.2014.02.005

VZD. (2021). *Decarbonisation Pathways for the Australian Cement and Concrete Sector,* . Düsseldorf .

WEB-1. (2024). https://www.mckinsey.com/industries/chemicals/our-insights/laying-the-foundation-for-zero-carbon-cement#. . adresinden alındı

WEB-2. (2024). *https://www.statista.com/statistics/298776/cement-producers-number-of-plants/* >.

WEB-3. (2024). https://consencus.eu/demonstrations/: https://consencus.eu/demonstrations/ adresinden alındı

Wu, Y. W. (2024). Performance evaluation of a novel system for improving power generation and clean utilization of high-risk medical waste in a cement plant integrating with plasma gasification, gas turbine and ORC. *Journal of Cleaner Production,*(141389).

Xiao, Y. &. (2024). A review on application of microwave in cement life cycle. *Renewable uyand Sustainable Energy Reviews, 199*(114498).

Yang, K.-H., Jung, Y.-B., Cho, M.-S., & Tae, S.-H. (2015). Effect of supplementary cementitious materials on reduction of CO2 emissions from concrete. *Journal of Cleaner Production, 103,* 774-783.

Zia, U. Q. (2024). Decarbonizing Pakistan's Cement Sector: The Role of Carbon Capture and Storage (CCS) Technologies. *Engineering Proceedings, 75*(1), 7.

BÖLÜM 20

Magnezyum Metalinin Jant Üretiminde Kullanılması

Aydın Şık[1] & Emre Benzer[2]

[1] Prof. Dr., Gazi Üniversitesi Mimarlık Fakültesi Endüstriyel Tasarım Bölümü, ORCİD:0000-0002-8977-9094
[2] JMW Jant A. Ş. Tasarım Merkezi Müdürü, ORCİD:0000-0002-8587-4377

1. GİRİŞ

Magnezyum çelikten %75, titanyumdan %50 ve alüminyumdan %33 daha hafiftir ve bu da onu kullanan uygulamalarda ciddi verimlilik tasarrufu sağlar. Magnezyum en hafif yapısal metallerden biridir. Bu nedenle otomotiv ve havacılık bileşenleri gibi ağırlık azaltmanın öncelikli olduğu uygulamalarda sıklıkla kullanılır.

Magnezyum jantların avantajları ve dezavantajları, bir arabanın mekanik modeline dayanarak ele alınır. Magnezyum jantlar genellikle yarış arabalarına uygulanır çünkü alüminyum alaşımlarından biraz daha iyi mukavemet/ağırlık oranı sağlarlar. Magnezyum alaşımlarının daha hafif olmasının yanı sıra, titreşimlerin enerjisini dağıtmada da iyidirler. Bir tekerleğin jantındaki enerji dağılımının rolü çeyrek araba modeli ile tahmin edilir. Magnezyum jantların kullanımıyla güvenlikte yapılan iyileştirmeler ele alınır. Arabanın fren mesafesi ve tepkisi, hem Anti Blokaj Sistemi (ABS) kullanılarak hem de kullanılmadan incelenir. Jant ağırlığının arabanın çeşitli kullanım parametreleri üzerindeki etkisi nicel olarak test edilir.

Tekerlek ağırlığı, bir otomobilin "yaylanmamış" ağırlık kütlesinin (lastikler, jantlar, fren diskleri, vb.) temel bir bileşenidir ve doğrudan araç performans parametrelerini ve süspansiyon bileşenlerinin ömrünü etkiler. Daha hafif bir tekerleğin dönmesi ve durdurulması daha düşük atalet momentumu nedeniyle çok daha kolaydır. Dövme magnezyum jantlar daha kısa fren mesafesi ve daha hızlı ivmelenme sağlar, manevra kabiliyetini, genel performansı, güvenliği iyileştirir ve ayrıca yakıt tüketimini azaltır (%5-7'ye kadar). Magnezyum alaşımlarının sönümleme kabiliyeti (yol kusurlarından kaynaklanan şok ve titreşimlerin emilimi), alüminyumdan yapılanlardan 100 kat daha yüksektir. Bu, süspansiyon braketlerinin dayanıklılığının artmasını, aracın düzgün ve kolay hareket etmesini, süspansiyon ve frenlerin daha uzun ömürlü olmasını sağlar.

Yarış dünyasında, dönme kütlesini azaltmak araç performansını artırmak için en önemli önceliktir. Magnezyum jantlar **alüminyumdan %40 daha hafif** olacak şekilde tasarlanmıştır ve bu da viraj alma, hızlanma ve frenlemede önemli iyileştirmeler sağlar. Bu ağırlık azaltımı daha çevik bir sürüş deneyimine yol açar ve aracın yeteneklerini hem yolda hem de pistte en üst düzeye çıkarmaya olanak tanır.

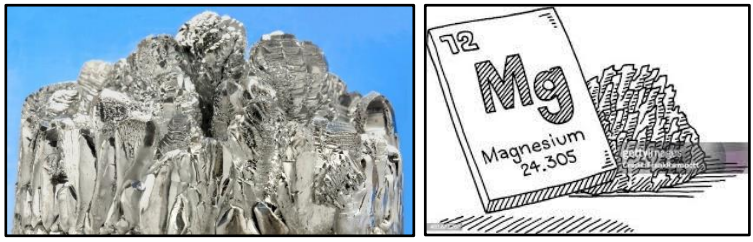
2. MAGNEZYUM VE ALAŞIMLARI

Metal magnezyum (Mg) XIX. yüzyılın başlarına kadar elde edilememiştir. Buna karşılık, magnezyum, bileşiklerinin bazıları, çok daha önce biliniyordu.

Sözgelimi, 1695'te İngiliz botanikçisi Nehemiah Grew, İngiltere'nin Epsom bölgesindeki maden sularının tıbbî özellikleriyle ilgilenmeye başlamıştı. Araştırması sonunda yeni bir tuz bulan Grew, maden sularına "şifalı olma" özelliği kazandıran bu tuza "Epsom tuzu" adını verdi. Daha sonraları, Epsom tuzunun, bilinmeyen bir metal olan magnezyumun sülfatı olduğu anlaşıldı.

1808'de İngiliz kimyacısı Humphry Davy kuru magnezyum klorürle metal potasyumu özütlemeyi başardı. 1831'de yeterli miktarda magnezyum elde edilebildi. Magnezyum, nispeten tepkin bir metaldir. Bu yüzden, doğada serbest olarak bulunmaz. Günümüzün mevcut teknolojileri ile ticari magnezyum üretiminde en yaygın kullanılan cevherler; manyezit ($MgCO_3$), dolomit ($MgCa(CO_3)_2$), karnalit ($KMgCl_3.6H_2O$) ve brusittir ($Mg(OH)_2$). Öteki mineralleri arasında magnezyum klorürler, magnezyum sülfatlar ve magnezyum silikatlar bulunur.

Magnezyumun birincil üretim miktarları USGS'in (ABD Jeoloji Araştırmaları Kurumu (United States Geological Survey)) raporunda; magnezyum bileşikleri ve metal magnezyum olarak iki ayrı başlık altında yer almaktadır. Magnezyum bileşikleri üretimi; 2020 yılında dünya toplamı 27 milyon ton iken 2021 yılında bir miktar artarak 30 milyon ton olmuştur. Dünyanın en büyük üreticisi olan Çin magnezyum üretiminde de açık ara ile liderdir ve dünya üretimin yaklaşık %70'ini gerçekleştirmektedir. Çin; 2020 yılında 19 milyon ton ve 2021 yılında 21 milyon ton üretim yapmıştır. Çin'den sonra sıralamada ikinci sırada %7'lik pay ile Brezilya (2 milyon ton) ve üçüncü sırada %5'lik pay ile Türkiye (1,6 milyon ton) yer alır. Türkiye'nin ardında Rusya (1,1 milyon ton), Avusturya (870 bin ton), Avustralya (770 bin ton), İspanya (720 bin ton), Yunanistan (550 bin ton), Slovakya (530 bin ton) bulunur (USGS, 2022) (Eroğlu, 2022).



Şekil 10. Magnezyum

Tablo 2. Dünya Magnezyum Bileşikleri (MgO) Üretim Miktarları *(USGS, 2022) (Eroğlu, 2022)*

ÜLKELER	ÜRETİM MİKTARI (ton)			Dünya Payı (%)
	2019	2020	2021	
Çin	19.000.000	19.000.000	21.000.000	70
Brezilya	1.500.000	1.800.000	2.000.000	7
Türkiye	**1.500.000**	**1.470.000**	**1.600.000**	**5**
Rusya	1.500.000	1.000.000	1.100.000	4
Avusturya	780.000	790.000	870.000	3
Avustralya	320.000	700.000	770.000	2
İspanya	570.000	650.000	720.000	2
Yunanistan	530.000	500.000	550.000	2
Slovakya	475.000	480.000	530.000	2
Diğer ülkeler	700.000	920.000	1.000.000	3
Toplam	**27.100.000**	**27.000.000**	**30.000.000**	

Ülkemiz magnezyum bileşikleri üretiminde de lider ülkeler arasında yer almaktadır. Türkiye 2021 yılında 1,6 milyon ton üretim gerçekleştirerek Çin ve Brezilya'nın ardından üçüncü sırada yer almıştır. Çok fazla endüstriyel alanda kullanılan magnezyum bileşikleri tüm dünyadan talep görmekte ve dünyanın her yerine ihraç edilmektedir (Eroğlu, 2022)**.**



Şekil 11. Magnezyumdan yapılmış çeşitli ürünler *(Şık, 2010) (Şık, 2003)*

Magnezyum minerallerinin yataklarına her yerde bolca rastlanır. Bu arada deniz suyunda da, çözünür magnezyum, klorür ve magnezyum sülfatlardan bolca bulunur. Lut Gölü'nün suları, yaklaşık yüzde on oranında magnezyum klorür kapsadığından zengin bir magnezyum kaynağı sayılır.

Tablo 3. Magnezyum metalinin diğer metaller ile karşılaştırması *(Car, 2024)*

Özellik	**Magnezyum**	**Alüminyum**	**Çelik**	**Titanyum**
Yoğunluk g/cm^3	1,7	2,7	7,9	4,4
Erime noktası ^{0}C	650	658	1540	1660

Günümüzde enerji kaynaklarının ve ekolojik dengenin korunması otomotiv sektörünü yakıt tüketiminde zorunlu kısıtlamalara götürmektedir. Bu amaçla araç lastiklerinde sürtünmenin azaltılması, ağırlıkta azalma, motor ve transmisyon verimliliğinin artırılması, araç ön alanının küçültülmesi ve aerodinamik tasarım gibi yaklaşımlar üzerine çalışılmaktadır. Örneğin araç ağırlığında yaklaşık 100 kg'lık bir azalma ile 100 km'de 0,5 litre bir yakıt tasarrufu oluşturmaktadır. Ağırlıktan 40 kg'lık azalma, atmosfere verilen eksoz gazlarında da azalma sağlamaktadır. Yakıt tüketimini azaltmak için, otomotiv endüstrisinin mutlaka hafif, aynı zamanda da güvenilir malzeme kullanması zorunludur. Bu kapsamda özellikle otomobil üretiminde ağırlıktan azalma üretici firmaların en önemli hedefi haline gelmiştir. Otomotiv endüstrisinin Magnezyum (Mg) kullanımındaki artış geçen 10 yıl içerisinde her yıl %15 olarak gerçekleşmiştir. Bu artışın önümüzdeki 10 yıl içerisinde %12'lik oranla artmaya devam edeceği beklenmektedir (Eratıcı, 2011).



Şekil 12. Magnezyum jantlar *(www.ipeoffical.com, 2024)*

Eylül 2020'de Çin, dünya çapında ilgi çeken "karbon nötrlüğü" ve "emisyon zirvesi" stratejilerini önerdi. Magnezyum (Mg) ve magnezyum alaşımlarının kapsamlı uygulaması, hedefe ulaşmak için en iyi çözümlerden biridir. Mg alaşımları, ağırlık tasarrufu ve CO_2 emisyonu azaltımı için büyük bir potansiyele sahip en hafif yapısal malzemelerdir. Ayrıca, Mg alaşımları yüksek özgül mukavemet ve sertliğe, üstün sönümleme performansına, iyi biyouyumluluğa, büyük hidrojen depolamaya ve pil vb. ürünler için yüksek teorik özgül kapasiteye sahiptir (Song, 2022) (Laccourreye, 2019) (Li, 2021) (Jia, 2021).

Magnezyum ve alaşımları dünyada havacılık, otomotiv gibi alanlarda uygulanmıştır. Ayrıca, Mg ve Mg alaşımının biyomedikal ve enerji sektörlerinde uygulanması son zamanlarda giderek artan bir ilgi görmüştür. Ancak, magnezyum alaşımlarının daha fazla uygulama alanını genişletmek için hala üstesinden gelinmesi gereken çok sayıda zorluk bulunmaktadır (Malik, 2021) (Molaei, 2021) (Peng, 2021). Magnezyum alaşımlarının nispeten düşük mukavemeti, zayıf plastisite ve düşük korozyon direnci yapısal uygulamaları engellemektedir, Mg alaşımlarının hızlı bozunma oranı ve dar hidrojen yükleme ve boşaltma penceresi

sorunlarının, Mg alaşımlarının gelecekteki uygulama alanını genişletmek için işlevsel malzemelerde çözülmesi gerekmektedir (Shang, 2021) (Shi, 2021) (Xie, 2021) (Dahman, 2017).

Tablo 4. Magnezyum alaşımlarının ve diğer malzemelerin ağırlıklarının karşılaştırılması (Zhang, 2015) (Polmear, 1996) (Aghion, 2001) (Kainer, 2004)

	Motor Bloku		Dişli Kutusu + Debriyaj	Karter	Dört teker (Jant)		Motor Kızağı	
	Dökme Demir	Al Alaşımı			Çelik	Al Alaşımı	Çelik	Al Alaşımı
Geleneksel çözüm (kg)	32	23,5	21,5+5	3	36	23	25	17,5
Magnezyum alaşımı (kg)	19	19	15+5	2	18	18	15	15
Azalan ağırlık (kg)	13	4,5	6,5	1	18	5	10	2,5
Azalma (%)	40	19	30	33	50	22,5	40	30

Yeni enerji araçları, gelecekteki araçların geliştirme yönü olarak (Minggao, 2006), enerji tasarrufu, çevre koruma, güvenlik gibi performansları nedeniyle yaygın ilgi görmektedir. Ancak, mevcut hibrit, yakıt hücreli ve diğer yeni enerji araçları yapısal karmaşıklıkları, artan bileşenleri gibi nedeniyle artan ağırlığa yol açacaktır. Şu anda hafif ağırlık patlamasının yükselişi, otomobilin enerji tasarrufu ve çevre koruması ile ilgili en doğrudan ekonomik ve sosyal faydalara sahiptir. 100 kilogramlık ağırlık azaltımı, bir araç için 100 kilometrede yaklaşık 0,5 litre yakıt tasarrufu anlamına gelir (Kaneko, 2003). Yakıt tüketimi ve egzoz emisyonları azaldıkça, çevre de buna bağlı olarak daha az kirlilik için iyi korunabilir. Araç ağırlığını azaltmak için makul bir malzeme seçimi çok önemlidir. Yeni enerji kaynaklı (hibrit, yakıt hücreli vb.) otomobillerin ağırlığını daha da azaltmak için 1,74 g/cm^3 yoğunluğa sahip magnezyum alaşımları önerilir. Alüminyumdan (2,7 g/cm^3) %35 daha hafiftir. Ancak çoğu durumda performansları oldukça benzerdir. Yatak bileşenleri olarak, tekerlek göbeği yeni enerji araçlarındaki ana endişelerden biridir. Magnezyum alaşımlı jant, alüminyum alaşımından 4 kg daha hafiftir. Dinamik analiz kombinasyonu, magnezyum alaşımlı jantın, yeni enerji araçlarında hala yaygın olarak kullanılan alüminyum alaşımının yerini tamamen alabileceğini gösteriyor. Mukavemet analizi ve hesaplaması ile testlerin kullanımı birleştirildiğinde, alüminyum alaşımlı jantlar yerine magnezyum alaşımlı jantların yorulma mukavemeti için standart talepleri karşılayabileceğini göstermektedir. Magnezyum alaşımlı jantın döküm işlemi uygulanabilirdir. Alüminyum yerine magnezyum alaşımının uygulanması önemli bir ağırlık kaybı sağlar ve diğer önemli bileşenlerdeki magnezyum alaşımı uygulamaları için yararlı bir referans sağlar (Zhu, 2010).

Magnezyum jantlar genellikle yarış arabalarında kullanılır ve yaylanmamış kütleyi azaltabilir, fren mesafesini kısaltabilir, daha hızlı ivmelenme sağlayabilir ve genel performansı iyileştirebilir.



Şekil 13. OE Kapağı İçin Hazır Porsche 991.1 991.2 GT3 RS Porsche 991 GT2 RS Porsche 992 GT3 *(www.ipeofficial.com, 2024)*

Modelleme sonuçları, magnezyum jantların daha iyi sönümleme faktörünün araç kullanımında küçük bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Ancak, daha hafif jantlar birçok açıdan aracın tepkisini önemli ölçüde iyileştirir. Ayrıca, daha küçük salınımlar nedeniyle lastik ömrü artar. Fren mesafesi, ABS'li veya ABS'siz tüm jantlar için hemen hemen aynıdır ancak kritik frenleme sırasında araç tepkisi, ABS ve daha hafif jantların kombinasyonu kullanılarak önemli ölçüde iyileştirilir. Hafif metal jantların küçük bir dezavantajı, salınımların biraz daha büyük bir kısmı yaylı kütleye iletildiğinde ince dalgalı yolda daha yüksek araç titreşimleridir. Jant, bir otomobilde bükülme ve burulma yüklerine maruz kalan oldukça stresli bir bileşendir. Uzun ömür ve yüksek stresler ile ağırlık azaltma ihtiyacı nedeniyle, malzeme ve üretim süreci seçimi jant tasarımında önemlidir. Maliyet, performans ve ağırlık nedeniyle malzemeler ve üretim süreçleri arasında rekabet vardır. Bu, performansı artırmak ve üretimi daha ucuz olan, aynı zamanda yorulma dayanıklılığını ve diğer işlevsel gereksinimleri koruyan daha hafif bileşenlere olan endüstri talebinin doğrudan bir sonucudur. Daha hafif jantlar, yaylanmamış kütleyi azaltarak yol tutuşunu iyileştirebilir, süspansiyonun araziyi daha yakından takip etmesini ve böylece tutuşu iyileştirmesini sağlar, ancak tüm alaşım jantlar çelik eşdeğerlerinden daha hafif değildir. Genel araç kütlesindeki azalma da yakıt tüketimini azaltmaya yardımcı olabilir. Günümüzde arabalarda jantlar için çelik alaşım kullanılmaktadır. İlerlemelerle birlikte hareket ettikçe magnezyum alaşımı jant için kullanılabilir.

Tablo 5. Tekerlek üretimi için uygun potansiyel magnezyum alaşımlarının listesi *(Kulekci, 2008) (Aghion, 2000)*

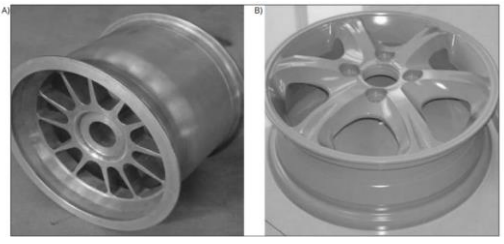
Mechanical Properties	Requirements for Wheel Production	Magnesium Alloys													
		AM100	AS41	AZ31	AZ61	AZ80	AZ81	AZ91	EZ33	HK31	ZE41	ZK60	AM20	AM60	AM70	WE43
Specific Strength (MPa*cc/g)	Minimum 80 MPa*cc/g	144.75	118.64	146.89	172.22	191.67	153.33	127.07	76.50	145.25	112.64	196.72	117.98	133.33	N/A	135.87
Ductility (Elongation)	Minimum 7%	7%	6%	15%	16%	5%	15%	3%	2%	21%	5%	12%	20%	13%	N/A	7%
Fatigue Strength (MPa)	Minimum 75 MPa	70	N/A	120	125	100	76	95	100	70	130	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Impact Strength (J)	Minimum 3 J	2.0	2.5	3.2	2.2	N/A	4.5	1.3	0.8	3.0	1.4	N/A	4.2	3.0	1.8	N/A
Corrosion Rate ($mg/cm^2/day$)	Minimum 0.64 ($mg/cm^2/day$)	N/A	0.25	N/A	N/A	N/A	N/A	0.63	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0.13	N/A	N/A
Galvanic Corrosion	Zero tolerance	Satisfied	Satisfied	Satisfied	Satisfied	Satisfied	Satisfied	Satisfied	Satisfied	Satisfied	Satisfied	Satisfied	Satisfied	Satisfied	Satisfied	Satisfied
Tensile Strength (MPa)	N/A	262	210	260	310	345	276	230	140	260	205	360	210	240	N/A	250
Yield Strength (MPa)	N/A	124	140	200	230	250	85	169	95	195	140	295	90	130	N/A	162
Density (g/cc)	N/A	1.81	1.77	1.77	1.80	1.80	1.80	1.81	1.83	1.79	1.82	1.83	1.78	1.80	N/A	1.84

Magnezyum alaşımlarının belirlenmesinde endüstri, ASTM (Amerikan Malzeme Test ve Test Topluluğu) tarafından onaylanan ve ASTM B951-10 standardında belirtilen Amerikan sistemini uygulamaktadır. Magnezyum alaşımları genel olarak teknolojik uygulama açısından döküm alaşımları ve metal şekillendirme alaşımları olarak ikiye ayrılabilir. Magnezyum jantların üretiminde kullanılan döküm magnezyum alaşımları arasında AZ91, AM50, AM60, AE44, ZK61, ZE41, EZ33, EQ21, WE43 ve yeni geliştirilen Mg-2.96Nd-0.21Zn-0.39Zr alaşımı bulunur. Magnezyum jantların üretiminde kullanılan metal şekillendirme magnezyum alaşımları arasında AZ31, AZ61, AZ80 ve ZK30, ZK60 bulunur. AZ91, döküm için en popüler magnezyum alaşımını oluşturur. İyi çekme dayanımı özellikleri ve akışkanlığı ile karakterize edilir. Önemli alüminyum içeriği (kütlenin yaklaşık %9'u), alaşıma oda sıcaklığında düşük süneklik kazandırır (Polmear, 1999). Alaşım çökelme sertleştirmesine tabi tutulur. Sünekliği artırmak için alaşım, 415-435 °C aralığında homojenleştirilir (Reguła, 2008). Aşırı doygunluk tipik olarak 415-430 °C aralığında gerçekleştirilir, yaşlandırma ise aranan özelliklere bağlı olarak 170-200 °C aralığında gerçekleştirilebilir (Thirumurugan, 2013). Örneğin, çalışmada (Jiang, 2012) AZ91D alaşımı, kalıp döküm ve çift kontrollü şekillendirme yoluyla motosiklet tekerlekleri yapmak için kullanıldı. Çalışma, basınçlı kalıp döküm yoluyla ve AZ91D alaşımından yeni bir çift kontrollü şekillendirme yöntemiyle üretilen motosiklet tekerleklerinden elde edilen numunelerin mikro yapıları ve mekanik özelliklerinin bir karşılaştırmasını sunmaktadır. Yeni yöntem külçelerin sıkıştırılmasından oluşur. İşlevsel özellikler,

basınçlı kalıp döküm yoluyla elde edilenleri aşmaktadır. Tekerlekler söz konusu olduğunda, düşük kütleye ek olarak, titreşimleri sönümleme yeteneğinin de önemli olması nedeniyle, numaralı makalenin yazarları, AZ91'den yapılmış tekerlekleri, 6061-T6 alüminyum ve SPFH540 çeliğine göre titreşim modellemesi açısından analiz ettiler. Magnezyum AZ91 alaşımı en iyi titreşim sönümleme özelliklerini gösterdi. Aynı yazarlar tarafından FEM yöntemi kullanılarak yapılan analizler, AZ91 magnezyum alaşımının eğilme ve radyal yükler açısından magnezyum tekerleklerde kullanım için en uygun olduğunu da göstermektedir (Jiang, 2018) çalışmada, yine aynı malzemeler: 6061 T6 alüminyum, SPFH540 çelik ve AZ91 karşılaştırılmıştır. Analiz, kesin olmayan sonuçlara rağmen, hafif yapılar için magnezyum alaşımının tercih edildiğini ortaya koymuştur. AZ91 alaşımı bağlamında FEM analizlerinin konusu, aynı zamanda düşük basınçlı döküm bağlamında teknolojik sürecin unsurlarıdır.



Şekil 14. Mg-2.96Nd-0.21Zn-0.39Zr'nin magnezyum tekerlekleri *(Zhenming, 2016)*



Şekil 15. AZ80 magnezyum tekerlek (A) Magnezyum alaşımlı dövmeler *(Nguyen, 2017)*, (B) Ekstrüde edilmiş Mg alaşımlı tekerlekler (14×6) J *(Liu, 2023)*



Şekil 16. Jantta Mg alaşımının geliştirilmesi ve uygulanması: (a) Chevrolet Corvette için Mg alaşım jant; (b) Cadillac CT4-V dövme Mg jant; (c) Biyonik tasarıma sahip AMG Project One 9 kollu Mg dövme jantlar; (d) İçi boş kütük ekstrüde Mg alaşım jant: (14×6) J; (e) İçi boş kütük ekstrüde Mg alaşım jant: (13×10) J; (f) İçi boş kütük ekstrüde Mg alaşım jant: (13×8) J; (g) Bugatti Chiron Super Sport 300+Mg jant; (h) Porsche 911 GT3 RS Mg dövme jant; (i) Bandit9 elektrikli yarış Mg jant; (j) Dingxin Magnezyum Teknolojisi Şirketi'nden Mg alaşım otomobil jantı ileri ve geri ekstrüzyon şekillendirme teknolojisi süreci *(Liu, 2023)*.

3. MAGNEZYUM REZERVLERİ

Amerikan araştırma enstitülerine göre dünya üzerinde 330 milyon mil küp deniz suyu bulunur. 1 milküp deniz suyunda ise 6 milyon ton magnezyum bulunmaktadır. Magnezyum bol miktarda bulunan bir metal olmasına karşın yıllık magnezyum üretimi sadece 550.000 metrik ton iken alüminyum üretimi 22.000.000 metrik tona ulaşmaktadır. Hemen her gün kullanılan cinsten metaller kadar karşımıza çıkmasa da magnezyum, doğada son derece yaygın olarak bulunmaktadır. Cevher olarak dolomit ve magnezit adıyla sırasıyla $MgCO_3$, $CaCO_3$, $MgCO_3$ formunda mevcutken, deniz suyunda, tuzlu yer altı sularında ve yer üstü tuz çökeltilerinde klorür bileşiği halinde bulunmaktadır. Bunlardan sadece deniz suyu bile aslında tükenmez bir kaynak olarak düşünülebilir. Deniz suyundaki % 0,13 oranında magnezyum bugünkü kullanım miktarları üzerinden hesaplandığında, sadece İsrail'deki Ölü Deniz'de yaklaşık 20.000 yıl dünyaya yetecek kadar magnezyum bulunduğu söylenebilir. 1980'li yıllarda tüm dünyada magnezyum üretimi 200 bin ton iken 2005'te 500 bin ton olarak gerçekleşmiştir. Gelecek döneme ait kısa vadeli kapasite artırımı çalışmaları ise bu üretim miktarının 2 katına çıkmasına çıkacak şekilde gerçekleşmektedir (Xiuqing, 2006).

Büyük otomotiv şirketlerinin yakın zamanda yapmış olduğu anlaşmalar incelenecek olursa Wolkswagen'in İsrail'de yaptığı yaklaşık 200 milyon dolarlık büyük bir yatırımın olduğu göze çarpmaktadır. Ford'un Avustralya Queensland fabrikasında ve Toyota'nın yeni Noranda projesi için Kanada'da yaptığı yatırımlardan başka General Motors şirketinin Norsk Hydro ve Solikamsk ile magnezyum tedarik anlaşması imzaladığı görülecektir (Paramsothy, 2011).

Mg, Dünya kabuğunda oldukça bol miktarda bulunur ve yaygın olarak dağılmıştır ve kabuk yüzeyi metal cevheri içeriğinin yaklaşık %2,77'sini oluşturur (Liu, 2023). Çin, dünya Mg kaynaklarının %70'inden fazlasına, dünyanın en büyük ham Mg rezervlerine, dünyanın en büyük ham Mg üretimine ve dünyanın en büyük ham Mg ihracatına sahiptir (Li, 2018). Magnezit kaynakları, magnezit, dolomit, hidromagnezit, talk ve serpantin mineralleri dâhil olmak üzere yaklaşık 200 türe kadardır (Tang, 2015) (Long, 2005). Çin'deki tuz gölü dağılımının en büyük "zengin madeni" olan Qinghai, potasyum, Mg, lityum ve büyük potansiyel ekonomik değere sahip diğer tuz kaynakları açısından zengindir (Long, 2005). Çin Qinghai Tuz Gölü Magnezyum Endüstrisi, Mg rafinasyonu için yüksek kaliteli hammadde olan yüksek saflıkta ve düzgün boyutta hidromagnezit elde etmek için bol miktarda tuz gölü tuzlu su kaynaklarını kullanmıştır. Ancak, Mg hidroksit ve Mg oksit, Qinghai'deki Mg kaynaklarının avantajlarından çok uzak olan düzensiz parçacık şekline, düşük kaliteye, yeterince gelişmiş işlem teknolojisine, düşük katma değere ve diğer kusurlara sahiptir. Son zamanlarda, bazı yeni Mg

bazlı fonksiyonel malzemeler kademeli olarak geliştirilmiş ve yüksek saflıkta Mg araştırması artırılmış, bu da Mg kaynaklarının yüksek katma değerli alanlarda uygulanmasını genişletmiştir (Zhao, 2014).

4. MAGNEZYUM KULLANIMININ AVANTAJLARI VE DEZAVANTAJLARI

Araç ağırlığının azaltılması, otomotiv yakıt verimliliğinin iyileştirilmesinde önemli bir rol oynar (Aghion, 2001). Çelik ve alüminyum jantlar hâlihazırda ağırlığı önemli ölçüde azaltmak için kullanılıyor, ancak magnezyum alaşımlı jantlarla ek azaltmalar elde edilebilir (Li, 2014). Aslında, çeşitli magnezyum alaşımları hâlihazırda nispeten küçük miktarlarda otomobil parçaları için özellikle jantlarda kullanılmaktadır (Liu, 2015) (Wang, 2023).

Dünyada en sık bulunan sekizinci element olan magnezyumun son derece bol olduğu düşünülmektedir. Magnezyum geri dönüştürülebilir bir metaldir ve bir geri dönüşüm sistemi kurmak tedarikleri genişletecek ve enerji tasarrufu sağlayacaktır. Magnezyumun otomobil kullanımındaki büyük artışı sonunda magnezyumun üretim kapasitesinin de artırılması gerekecektir. (Garmo, 1997).

Magnezyum otomotiv jantlarının üretimi için ilginç bir malzemedir, bunun başlıca nedeni hafifliğidir. Birim hacim başına alüminyumdan %36 ve demirden (Fe) %78 daha hafiftir. Farklı metallerle alaşımlandığında magnezyum tüm metaller arasında en yüksek mukavemet-ağırlık oranına ulaşabilir. Magnezyum ağırlık azaltma için büyük bir potansiyel sunar. Mevcut üretim model arabaları ayrıca ortalama 2,72 kg/araba olan çeşitli küçük magnezyum dökümleri içerir. Yakın gelecekte, otomotiv endüstrisinde magnezyum kullanımının artması oldukça olasıdır (Garmo, 1997).

Magnezyum alaşımlı jantların kullanımı sadece hafiflikleriyle ilgili değildir; aynı zamanda atalet momentleriyle de ilgilidir. Magnezyum alaşımlı jantlar etraftaki en hafif jantlar olsa da herhangi bir jantın en kritik kriteri atalet momentidir ve magnezyum jantların öne çıktığı yer burasıdır. Magnezyum jantlar, çelik veya alüminyum jantlara kıyasla nispeten daha düşük bir atalet momentine sahiptir. Ayrıca, magnezyum jantlar günümüzün gelişmiş jantlarının çoğundan %30'a kadar daha hafiftir ve standart üretim jantlardan bile çok daha hafiftir (Kainer, 2004). Ağırlık tasarrufunun çoğunlukla tellerden ve janttan gelmesi nedeniyle, bunun sonucunda jantın kütlesi çoğunlukla dönme ataletinin yararına göbekte yoğunlaşır (Zhang, 2015). İkincisi, eylemsizlik momentini etkiler ve bu da gerçek faydalar üreten ve bir otomobilin performansının her yönünü büyük ölçüde iyileştiren kritik faktördür; bunların arasında en yaygın olanları dönüş, hızlanma ve frenlemedir (Kulekci, 2008).

Otomotiv endüstrisinde magnezyum kullanımında çeşitli sınırlamalar vardır. Bu sınırlamalar çoğunlukla metalin fiziksel özellikleriyle ilgilidir (Aghion, 2000). Magnezyumun nispeten reaktif bir metal olduğunu belirtmek önemlidir. Bu sorunu aşmak için metale koruyucu kaplamalar uygulanabilir veya doğal olarak oluşan bir oksit veya sülfat kaplamanın oluşmasına izin verilebilir. Magnezyumun korozyonu bir endişe kaynağı olmasına rağmen, yeni magnezyum alaşımlarının geliştirilmesi sayesinde bu sorun çözülmektedir (Polmear, 1996).

Magnezyumun kitlesel kullanımını engelleyen başlıca faktörlerden biri, nispeten yüksek ve istikrarsız fiyatıdır (1 Ocak 2021'de magnezyumun fiyatı metrik ton başına 4295 ila 4500 CAD$ arasındaydı) (Aluminium, 2022). (Polmear, 1996) pound başına magnezyum, çelikten 3,5 ila 6 kat ve alüminyumdan 1,7 ila 2,8 kat daha pahalıdır. Magnezyumun fiyatı alüminyumun %10 ila %80 üzerinde ve çeliğin %20 ila %30 üzerinde değişmektedir. Magnezyumun birleştirme veya imalat maliyetlerinin diğer metallere, yani alüminyum ve çeliğe kıyasla daha düşük olabileceğini belirtmek de anlamlıdır. Aslında, ağır malzemeleri daha hafif olanlarla değiştirerek ikincil ağırlık tasarrufları (yani bir arabanın) elde etmek mümkündür. Sonuç olarak, ömür boyu yakıt maliyetleri azalır. Bu nedenle, bir magnezyum parçasının toplam yaşam döngüsü maliyetinin aslında başka bir malzemeden yapılmış bir parçanın maliyetinden daha düşük olabileceği söylenebilir (Polmear, 1996).

- Magnezyumun hafif ağırlığından elde edilen üstün faydalar arasında araçta daha düşük yaylanmamış dönen kütle bulunur. Bu, daha hızlı hızlanma ve daha kısa durma mesafesi, daha iyi kullanım (özellikle dönüşlerde), artan yakıt ekonomisi, frenler ve lastikler için daha uzun ömür ve azaltılmış karbon emisyonları sağlar.
- Magnezyumun yüksek sönümleme özellikleri, ona herhangi bir yapısal metalin en yüksek titreşim emme oranını verir. Bu, daha iyi şok emilimi sağlar. Bu da bazı araç bileşenlerinin ömrünü uzatır ve daha konforlu bir sürüş sağlar. Lastik-yol etkileşimi için daha tutarlı bir temas alanı, araç performansını (hızlanma, frenleme, viraj alma) belirgin şekilde iyileştirir.
- Magnezyum, yaygın olarak bulunan tüm metaller arasında en yüksek güç-ağırlık oranına sahiptir.
- Mg'den yapılmış jantlar, aynı yük faktöründe alüminyum alaşımlarından %20-%25 daha hafiftir.

- Yüksek sönümleme kapasitesi nedeniyle Mg, titreşimleri ısıya dönüştürme konusunda eşsiz bir yeteneğe sahiptir. Bu, sürücü için çukurlu, engebeli yollarda daha az sarsıntı ve sarsıntı ile daha yumuşak bir sürüş ve süspansiyon sisteminin daha uzun ömrü anlamına gelir.
- Yüksek ısı iletkenliği ile Mg, jantlar daha hızlı ısı dağılımına olanak tanır ve böylece fren ve tekerlek tertibatı sistemlerinin aşırı ısınmasını önler.

Magnezyumun olumsuzlukları (Mordike, 2001);

- Elastisite modülü düşüktür,
- Soğuk şekillendirilebilirlik ve tokluk sınırlıdır,
- Yüksek sıcaklıklarda dayanım ve sürünme direnci sınırlıdır,
- Katılaşma esnasında yüksek miktarda çekme olur,
- Yüksek kimyasal aktiviteye sahiptir,
- Bazı uygulamalarda korozyon direnci sınırlıdır.

Magnezyum jantları tarihsel olarak etkileyen önemli bir dezavantaj, korozyona karşı duyarlılıktı. Magnezyum yüzey işleme teknolojisindeki son gelişmeler, korozyon sorunlarını büyük ölçüde çözülmüş ve bugün bazı üreticiler 10 yıllık garanti sunmaktadırlar.

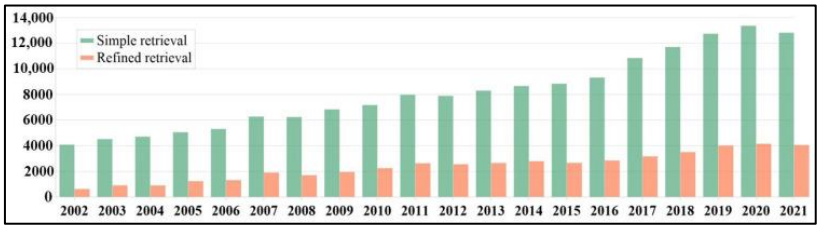
Magnezyumun yanıcılığının neden olduğu tehlike konusunda yaygın bir yanlış anlama devam etmektedir. Ancak son elli yılda yeni geliştirilmiş alaşımlar geliştirildi ve magnezyum tekerleklerinin alev aldığına dair rapor edilebilir bir olay yaşanmamıştır. Aslında, ABD Federal Havacılık İdaresi son on yılda kapsamlı testler gerçekleştirerek magnezyumun potansiyel yanıcılığının artık bir endişe kaynağı olmadığı sonucuna vardı ve hatta uçak kabinlerinde kullanımına izin verilmesine karar verdi.



Şekil 17. Çeşitli firmaların üretmiş oldukları magnezyum alaşımlı jantlar

(https://magnesiumwheels.com, 2024)

Günümüzde en yaygın jant metalleri çelik, alüminyum ve magnezyumdur. Magnezyum üçü arasında en pahalı olanıdır (bir ton magnezyumun piyasa fiyatı yaklaşık 2000 ABD doları civarında dalgalanmaktadır. Bu da alüminyumun fiyatından yaklaşık %20 daha yüksektir. Şekil 9'da Web of Science veri tabanında son 20 yılda yayınlanan magnezyum alaşımlarına odaklanan makaleler görülmektedir.



Şekil 18. Web of Science veri tabanında son 20 yılda yayınlanan magnezyum alaşımlarına odaklanan makaleler (Song, 2022)

Magnezyum günümüzde mevcut olan en hafif yapısal malzemedir (Song, 2022) (Dziubinska, 2023). Alüminyumdan 1,5 kat, çelikten ise 4,5 kat daha az yoğunluğa sahiptir. Bu nedenle magnezyum jantlar, karşılaştırılabilir mukavemet özellikleri sergilerken alüminyum jantlardan çok daha hafif olacak şekilde tasarlanabilir. Tablo 5'te, magnezyum jantların alüminyum jantlar ve çelik jantlarla karşılaştırılmasını göstermektedir.

Tablo 6. Magnezyum jantlar, alüminyum jantlar ve çelik jantlarla karşılaştırılması (Dziubinska, 2024)

	Magnezyum jantlar	Alüminyum Jantlar	Çelik Jantlar
Avantajları	Çelik ve alüminyum jantlardan daha hafiftir. Daha yüksek yakıt verimliliği, daha iyi frenleme ve daha uzun lastik ömre sahiptir. Magnezyum jantlar, çelik jantlardan çok daha iyi ısı iletimine sahiptir. Daha iyi ısı transferi, frenlerden gelen ısının dağıtılmasına yardımcı olur ve genellikle aşırı ısınmadan kaynaklanan fren arızası riskini azaltır. Magnezyum jantlar, alüminyum jantların 50 katını aşan sönümleme özelliklerine sahiptir. Özellikle motor, süspansiyon ve şanzıman gibi bileşenlerde aracın titreşim yükünü önemli ölçüde azaltabilirler. Bu etki, aracın genel performansını iyileştirmeye ve ömrünü uzatmaya katkıda bulunur.	Çelik jantlardan daha hafiftir. Daha iyi yakıt ekonomisi, daha iyi frenleme ve daha iyi lastik ömrüne sahiptir. Alüminyum jantlar çelik jantlardan çok daha iyi ısı iletimine sahiptir. Daha iyi ısı transferi, frenlerden gelen ısının dağılmasına yardımcı olur ve genellikle aşırı ısınmadan kaynaklanan fren arızası riskini azaltır.	Çelik jantlar alüminyum ve magnezyum jantlardan daha ucuzdur. Çelik jantlar alüminyum ve magnezyum jantlardan daha ağırdır, bu da kışın sürüş sırasında avantaj sağlayabilir. Çelik jantlar kamyonların ve ağır ekipmanların ihtiyaç duyduğu gücü ve dayanıklılığı sağlar.
Dezavantajları	Magnezyum jantlar korozyona karşı hassastır. Bu nedenle, bunlara koruyucu kaplamalar uygulanır. Magnezyum jantlar, alüminyum ve çelik jantlardan daha pahalıdır, bu nedenle özel otomobiller ve yarış arabaları için kullanılırlar.	Çelik jantlardan daha az sert ve dayanıklıdır. Çelik jantlardan potansiyel hasara daha yatkındır. Çelik jantlardan satın alınması ve onarılması daha pahalıdır. Bükülen çelik jantlar onarılabilir, ancak alüminyum jantlar bükülmez; bunun yerine kırılır ve daha yenileriyle değiştirilmesi gerekir. Alüminyum jantlar, çelik jantlara kıyasla galvanik korozyona karşı hassastır. Bu, önleyici tedbirler alınmazsa lastiklerden hava kaçağına neden olur.	Magnezyum alüminyum jantlara göre daha ağırdırlar ve bu nedenle daha az yakıt tasarrufu sağlayabilirler, daha uzun fren mesafelerine sahip olabilirler ve daha kısa ömürlüdürler.

5. ÜRETİM YÖNTEMLERİNE GÖRE MAGNEZYUM JANTLAR

Magnezyum jantlar, yapıları, şekilleri, tasarım boyutları, kullanılan magnezyum alaşımı türü, üretim yöntemleri ve uygulamaları gibi çeşitli kriterlere göre sınıflandırılabilir. Magnezyum jantların kategorilendirilmesi, özellikle uygulama bağlamında, hem üreticiler hem de kullanıcılar için önemli olabilir çünkü belirli çalışma koşulları için uygun jant seçimine yardımcı olabilir. Uygulamalarına bağlı olarak Mg jantların seçimi; Dayanıklılık ve düşük ağırlık, çap, genişlik, ofset, tasarım ve estetik özellikler gibi teknik parametreler ve endüstri standartlarına uygunluk olarak yapılmalıdır. Endüstrinin çeşitli dalları, ürünün geçerli standartlara uygun olup olmadığını belirlemek için piyasaya sürülmeden önce magnezyum jantları test eder. Böyle bir yaklaşım, ürünün, kullanım sırasında güvenliği sağlamak için kritik olan belirli kalite standartlarını karşılamasını garanti eder. Dünya çapında birçok ülke sertifikaları zorunlu kılar. Otomotiv endüstrisinde, araçların jantları onay sertifikasyonu ile ilişkili testlerden geçer, yani yeni

aracın yola elverişli olup olmadığını onaylar. Onay sertifikası, aracın standartları ve teknik gereksinimleri karşılayıp karşılamadığını inceler. Bu testlere dayanarak, aracın yasal olarak tescil edilmesini sağlayan onay sertifikası düzenlenir. Ülkeye ve uygulanan standartlara ve direktiflere bağlı olarak, jantlar diğerlerinin yanı sıra geçtiği testler; Yuvarlanma testi, döner bükme testi, jant/göbeğin çift eksenli yorulma testi, tuz püskürtme odası testi ve korozyon direnci testidir. Aracı etkili bir şekilde desteklemek ve normal çalışma sırasında oluşan kuvvetleri dengelemek için yeterli mukavemete sahip olması gereken çeşitli magnezyum jantlar ve jant tasarımları ve yapılandırmaları vardır. Önemli bir husus, optimum araç performansı elde ederken aracın genel ağırlığını azaltmak için jant tasarımının mümkün olduğunca hafif olmasını sağlamaktır (Dziubinska, 2024) (Luo, 2022) (Karim, 2022).

Üretim yöntemine bağlı olarak magnezyum jantların sınıflandırılması:

1. Döküm Magnezyum Jantlar: Erimiş magnezyum veya magnezyum alaşımlarının jant şeklindeki bir kalıba dökülmesiyle üretilirler. Alaşım daha sonra soğutulur ve sertleştirilerek son dairesel şeklini alır. Bu nispeten basit işlem jantların seri üretilmesini sağlar ve böylece üretimi nispeten ucuz hale gelir. Birçok araç türünde popüler olmalarına rağmen, diğer magnezyum jant türlerine göre daha az dayanıklı olabilirler. Dövme jantlarla karşılaştırıldığında daha ağır ve daha düşük kalitededirler. Döküm jantlarda görülen üretim kusurları arasında çukurlaşma veya gözeneklilik ve daha büyük tane boyutu gibi farklı bir metalürjik mikro yapı bulunur. Kullanım sırasında, döküm magnezyum jantlar yüksek hızlarda ağır darbe sırasında çatlamaya daha fazla eğilim gösterirken, dövme jantlar bükülmeye daha yatkındır (Papenberg, 2020). Birçok zorluğun son teknoloji ürünü teknolojik çözümlerle çözülmesiyle, Brembo (Marchesini), BBS, Taneisya ve SMW dahil olmak üzere bir dizi şirket artık yeni nesil güvenilir dövme magnezyum jantlar üretmektedirler (https://magnesiumwheels.com, 2024).

2. Dövme Magnezyum Jantlar: Yüksek deformasyon ve sıcaklık koşullarında bir magnezyum alaşım bloğunun ekstrüde edilmesi veya dövülmesiyle üretilirler. Bu da istenen şekil ve mukavemeti elde etmeyi sağlar. Dövme jantlar, hafiflikleri ve dayanıklılıkları nedeniyle değerlidir ve bu da onları spor ve yarış arabalarında tercih edilir hale getirir. Üretim süreci döküm jantlara göre daha karmaşık ve pahalıdır, ancak aşırı koşullarda mükemmel performans sunar. Bu süreç, döküm jantlara kıyasla daha düzgün ve dayanıklı bir malzeme yapısına yol açar. Magnezyum alaşımlı jantların metal şekillendirilmesi, dar şekillendirme sıcaklığı parametreleri aralığı ve gerinim hızına duyarlılığı nedeniyle zor bir iştir (Blawert, 2004). Mg jantların üretimini sınırlayan ana olgu, yetersiz veya aşırı

şekillendirme sıcaklıklarında veya aşırı deformasyon hızında ortaya çıkan çatlamadır. Sonuç olarak, magnezyum jantların plastik şekillendirme işlemi, deformasyon sırasında izotermal sıcaklık koşullarını korurken düşük çalışma hızlarına sahip dövme makinelerinde sıcak olarak gerçekleştirilir. Magnezyum jantlar, çoğunlukla bir çubuk stoğundan birkaç aşamada plastik deformasyonla dövülür. İşlem, birden fazla ısıyla, birden fazla takım setinde ve işlemler arasında ısıl işlemle birkaç dövme işleminde gerçekleşir. Elde edilen dövmeler daha sonra dövülmüş boşluktan fazla metal çıkarılarak son tekerlek şekline işlenir (tornada döndürülür ve frezelenir). Döküm tekerleklerin aksine, dövme tekerlekler ince taneli bir yapı ve daha iyi mekanik özellikler ile karakterize edilir. Dövme magnezyum tekerlekler döküm tekerleklerden yüzde 25 daha hafif olmasına rağmen, yüksek üretim maliyetleri nedeniyle daha az kullanılırlar. Bitmiş magnezyum dövme tekerlekler pazarlanmadan önce uygun kalibrasyon derecelerine ulaşmalıdır. Mevcut raporlar, dövme tekerleklerin tellerde yorulma çatlamasına eğilimli olduğunu göstermektedir. Tekerlek dövmelerinin metal şekillendirilmesi sırasında, tellerde küçük bir deformasyon ve tekerlek jantında büyük bir deformasyon olur. Bu, çatlamaya karşı duyarlılıklarını etkileyen tekdüze olmayan bir yapı ile sonuçlanır. Bu nedenle, tel bölgesinde deformasyonun artması konusu henüz çözümlenmemiş olup, gelişimsel bir araştırma konusudur.

3. İşlenmiş Magnezyum Tekerlekler: Bunlar, tornalama, frezeleme ve tekerleğe son şeklini ve bitişini veren diğer mekanik işlemler dâhil olmak üzere bir magnezyum alaşım bloğunun işlenmesiyle üretilir. Bu yaklaşım, doğru boyutların ve yüksek kaliteli tekerlek yüzeylerinin elde edilmesini sağlar.

4. Hibrit Magnezyum Tekerlekler: İstenilen özellikleri ve şekli elde etmek için döküm, metal şekillendirme ve işleme gibi farklı üretim teknolojilerini birleştirirler. Bu yaklaşım, farklı süreçlerin avantajlarını birleştirerek, güç, hafiflik ve boyutsal doğruluğun dengeli bir kombinasyonunu sağlayabilir (Khatkar, 2023) (Wang, 2010) (Czerwinski, 2008). Listelenen teknolojilerin çoğu magnezyum tekerlek üreticileri tarafından kullanılmaktadır. Magnezyum jantların önemli üreticileri arasında yer alan şirketler; BBS USA (Braselton, GA, ABD), Marvic Wheels (Brunello, İtalya), OZ Group (San Martino di Lupari, İtalya), Enkei Corporation (Shizuoka, Japonya), Marchesini (Curno, İtalya), DYMAG (Chippenham, İngiltere), BlueTech Global (Bloomfield Hills, MI, ABD), mbDESIGN (Gelnhausen, Almanya), iPE (Tayvan, Çin), RAYS (Osaka, Japonya), HRE Performance Wheels (Vista, İngiltere), Tan-ey-sya (Imizu, Japonya), SMW (Riga, Litvanya), APP Tech Forged Wheels (Mestrino, İtalya), Ronal Group (Härkingen, İsviçre), MKW Alloy (City of Industry, Kaliforniya, ABD), Minilite (Telford, İngiltere),

Washi Beam (Nottingham, İngiltere) ve Cromodora Wheels (Ghedi, İtalya) bulunmaktadır. Magnezyum jant üretiminde döküm teknolojileri ile üretilen jantları kullanan; Marchesini (Curno, İtalya), BBS USA (Braselton, GA, ABD), DYMAG (Chippenham, İngiltere), Marvic Wheel (Brunello, İtalya), Enkei (Shizuoka Bölgesi, Japonya) ve OZ Group (San Martino di Lupari, İtalya) şirketlerdir. Kalıp dövme teknolojisi ile üretilen jantları kullanan; Blue-Tech Global (Bloomfield Hills, MI, ABD), mbDESIGN (Gelnhausen, Almanya), BBS USA (Braselton, GA, ABD), iPE (Tayvan, Çin), RAYS (Osaka, Japonya), DYMAG (Chippenham, İngiltere), Tan-ey-sya (Imizu, Japonya), SMW (Riga, Litvanya), OZ Group (San Martino di Lupari, İtalya) ve APP Tech Forged Wheels (Mestrino, İtalya) şirketlerdir. Magnezyum alaşımlı jantların üretiminde akış şekillendirme işlemi HRE Performance Wheels (Vista, İngiltere) ve BBS USA (Braselton, GA, ABD) tarafından kullanılmaktadır. Döndürme akış teknolojisi magnezyum jant üreticisi Enkei (Shizuoka, Japonya) tarafından kullanılmaktadır. Magnezyum jantların üretiminde işleme tekniği Marvic Wheel (Brunello, İtalya), BBS USA (Braselton, GA, ABD) ve OZ Group (San Martino di Lupari, İtalya) şirketleri tarafından kullanılmaktadır. Bu üreticilerin bazıları dövme, akış şekillendirme ve işleme veya diğer kombinasyonlar gibi çeşitli dövme tekniklerinden oluşan hibrit prosesler kullanmaktadır.

5. MAGNEZYUM JANTLARIN BİRLEŞTİRİLMESİ

Magnezyum alaşımları kaynağı alüminyum alaşımları kaynağı ile büyük benzerlik gösterir. TIG, MIG, lazer, elektrik direnç ve sürtünme karıştırma kaynak yöntemleri magnezyum alaşımlarına uygulanan en yaygın kaynak yöntemleridir.

Magnezyum alaşımlarının çoğu MIG ve TIG süreçleriyle kaynak edilebilir. Kaynak kabiliyeti Tablo 6'da sıralanmış bütün Mg alaşımları kaynak edilebilir. Ancak bunların bu kabiliyeti her alaşım için aynı derecede değildir. Tablo 6'da bu dereceler A (mükemmel), B (iyi), C (fena değil) ve D (sınırlı) olarak kademelendirilmiştir. Bu kademelendirme geniş ölçüde çatlamaya eğilimden yoksunluk ve biraz da birleştirme verimine dayanmaktadır. En elverişli kaynak koşulları, uygun birleştirme tasarımı dâhil altında az çok bütün Mg alaşımları için %60 ilâ %100 birleştirme verimleri elde etmek mümkündür.

Tablo 7. Mg alaşımlarının göreceli kaynak kabiliyeti (Burhan, 1990)

Alaşım	Derece	Alaşım	Derece
Döküm Alaşım		Şekillendirilmiş Alaşım	
AM100A	B+	AZ10A	A
AZ63A	C	AZ31B, C	A
AZ81A	B+	AZ61A	B
AZ91C	B+	AZ80A	B
AZ92A	B	HK31A	A
EK30A	B	HM21A	A
EK41A	B	HM31A	A
EZ33A	A	ZE10A	A
HK31A	B+	ZK21A	B
HZ32A	C		
K1A	A		
QE22A	B		
ZE14A	C		
ZH62A	C		
ZK51A	D		
ZK61A	D		

Mg-Al-Zn alaşımlarında, (AZ31B, AZ61B, AZ63A, AZ80A, AZ81A, AZ91C ve AZ92A) %10'a kadar alüminyum, tane içyapısını incelterek kaynak kabiliyetini desteklerken %l'den fazla çinko içeriği, sıcakta gevrekleşme, dolayısıyla kaynakta çatlama eğilimini artırır. Böylece de yüksek çinko içerikli ZH62A ve ZK51A alaşımları çatlamaya çok yatkın olup kaynak kabiliyeti zayıftır. Thorium içeren HK31A, HM21A ve HM31A, mükemmel kaynak kabiliyetini sahip olup B+ veya A olarak kademelendirilmişlerdir (Burhan, 1990).

İlâve metallar

MIG kaynağında en çok kullanılan dört elektrod telinin bileşimleri Tablo 7'de verilmiştir. Bunlar gerektiğinde, TIG kaynağında ilâve metal olarak da kullanılırlar. Aralarında seçim, ana metalin bileşimine göre yapılır.

Tablo 8. Mg alaşımlarının gaz korumalı ark kaynağında kullanılan elektrod ve ilave metaller (AWS A5.19-69) (Burhan, 1990)

Element	ER AZ61A	ER AZ101A	ER AZ92A	EREZ33A
Al	5,8-7,2	9,5-10,5	8,3-9,7	…
Be	0,0002-0,0008	0,0002-0,0008	0,0002-0,0008	…
Mn	0,15 min.	0,13 min.	0,15 min.	…
Zn	0,40-1,5	0,75-1,25	1,7-2,3	2,0-3,1
Zr	…	…	…	0,45-1,0
Nadir toprak	…	…	…	2,5-4,0
Cu	0,05 max.	0,05 max.	0,05 max.	…
Fe	0,005 max.	0,005 max.	0,005 max.	…
Ni	0,005 max.	0,005 max.	0,005 max.	…
Si	0,05 max.	0,05 max.	0,05 max.	…
Toplam diğer	0,30 max.	0,30 max.	0,30 max.	0,30 max
Mg	Kalanı	Kalanı	Kalanı	Kalanı

ER AZ61A veya ER AZ92A bileşimine uygun elektrod telleri ya da ilâve metaller, AZ10A, AZB1B, AZ31C, AZ61A, AZ80A, ZE10A ve ZK21A şekillendirilmiş alaşımların kendi aralarında ya da kendileriyle kaynağında yeterli görülmektedir. Daha ucuz olması itibariyle ER AZ61A genellikle tercih edilir. Bu aynı elektrod telleri ya da ilâve metaller, yukardaki alaşımların herhangi birini HK31A, HM21A ve HM31A yüksek sıcaklık alaşımlarıyla birleştirmede kullanılırlar. Bununla birlikte bu yüksek sıcaklık alaşımlarının birbirleriyle birleştirilmelerinde, ER EZ33A önerilir. Şekillendirilmiş alaşımların dökme alaşımlarla birleştirilmelerinde, yukarıda belirtilmiş önerilere uyulacaktır; ancak ER AZ61A veya ERAZ92A yerine ERAZ101A kullanılabilecektir. Dökme alaşımların dökme alaşımlarla birleştirilmelerinde ER AZ101A elektrod teli veya ilâve metal genellikle önerilir. Bununla birlikte HK31A ve HZ32A'yi kendileriyle veya birbirleriyle birleştirmede ER EZ33A tercih edilir. HK31A ve HZ32A'nın herhangi bir dökme alaşımla birleştirilmelerinde ER AZ101A kullanılır.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Magnezyum jantlar hafif jantlardır, çelik veya alüminyum jantlardan çok daha hafiftir. Bu, hareket ettirilecek daha az ağırlık olduğu için araç için daha iyi kilometre sağlayacakları anlamına gelir. Magnezyum jantlarda aşırı ısınma daha azdır çünkü frenlerden gelen ısıyı alüminyum jantlara göre çok daha verimli bir şekilde dağıtmaktadır. Frenlerin aşırı ısınmasından dolayı sıkıntı olma olasılığı daha düşüktür, bu sorun fren balatalarını ve fren sistemindeki diğer parçaları etkileyebilir. Magnezyum jantlar, aracın motoru, süspansiyonu ve üzerindeki yükü ve aracın genel ağırlığını azaltır. Bu da yakıt tüketimini ve emisyonları azaltır.

Magnezyum kullanımı ayrıca süspansiyon sisteminde titreşim sönümleme ve artan fren güvenliği gibi iyileştirmelere de katkıda bulunmaktadır.

Magnezyum alaşımlı amortisörler, alüminyumdan üretilenlere göre 100 kat daha iyi sönümleme sağlar. Magnezyum alaşımları yüksek ısı iletkenliğine sahiptir, bu da fren parçalarının ve tekerleğin orta kısmının hızlı bir şekilde soğutulmasını sağlar. Magnezyum genleşmesine bağlı korozyon endişeleri, son teknoloji kaplama ve son kat kaplamalardaki gelişmelerle giderilmiştir. Magnezyumun estetik bir yönü de bulunmaktadır. Alüminyumun magnezyum bileşiği ile işlenmiş ve kromla kaplanmış yüzeyler alüminyumdan daha iyi görünmektedirler. Cilalı magnezyum parlak ve çekiciliği sağlamaktadır.

Magnezyum jantlar ve nadir metaller için magnezyum, drag yarışı otomobillerinde en yaygın olarak kullanılmasına rağmen, magnezyum genellikle pompalar, yakıt filtreleri, valf kapakları, yağ karterleri, yakıt enjektörleri ve daha fazla bileşen yapımında kullanılır. Dövme magnezyum jantlar (döküm magnezyum) genellikle motosikletlerde kullanılır.

KAYNAKLAR

Aghion, E. B. (2000). Magnesium Alloys Development towards the 21st Century. Materials Science Forum, 350, 19-30. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.350351.19

Aghion, E. B. (2001). The Role of Magnesium Industry in Protecting the Environment. Journal of Materials Processing Technology, (117), 381-385.

Aluminium, P. O. (2022). Price on Magnesium and Aluminium.

Blawert, C. H. (2004). Automotive applications of magnesium and its alloys. Trans. Indian Inst. Met., 57:397-408.

Burhan, O. (1990). Demir Dışı Metallerin Kaynağı. İstanbul: OERLIKON Yayını.

Car, E. (2024), Erişim Tarihi: Ekim 07.11.2024). http://www.metalurji.org.tr/dergi/dergi188/d188_4050.pdf.

Czerwinski, F. (2008). Magnesium Injection Molding. New York, NY, USA: Springer.

Dahman, Y. (2017). Nanotechnology and Functional Materials for Engineers. Micro and Nano Technologies, pp. 1-17.

Dziubinska, A. (2023). Investigation of a New Screw Press Forming Process for Manufacturing Connectors from ZK60 Magnesium Alloy Preforms Materials 16:3467. doi: 10.3390/ma16093467

Dziubinska, A. S. (2024). Review of Magnesium Wheel Types and Methods of Their Manufacture. Materials, 17(3), 584. https://doi.org/10.3390/ma17030584

Dziubinska, A. S. (2024). Review of Magnesium Wheel Types and Methods of Their Manufacture. Materials (Basel), 25;17(3):584. doi:10.3390/ma17030584

Eratıcı, E. (2011). Magnezyum Alaşımlarının TIG Kaynak Özellikleri. İstanbul : T.C. Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi Metal Eğitimi Ana Bilim Dalı Metal Eğitimi Programı.

Eroğlu, G. (2022). Dünyada ve Türkiye'de Magnezyum Fizibilite Etütleri Daire Başkanlığı. Ankara: Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü.

Garmo, E. B. (1997). Magnesium and Magnesium Alloys. In: Materials and Processes in Manufacturing,. New York, 8th Edition, Wiley

https://magnesiumwheels.com. (2024), Erişim Tarihi: 08.Ekim.2024 https://magnesiumwheels.com

https://magnesiumwheels.com. (2024), Erişim Tarihi: 08.Ekim.2024 https://magnesiumwheels.com/for-engineers.html#:~:text=Magnesium%20wheels%20are%20produced%20either,prefabricated%20bar%20is%20deformed%20mechanically).

Jia, X. S. (2021). Influence of indentation size on the corrosion behaviour of a phosphate conversion coated AZ80 magnesium alloy. J. Mater. Res. Technol., 14, pp. 1739-1753.

Jiang X., L. R. (2018). Lightweight design and analysis of automobile wheel based on bending and radial loads,. IOP Conference Series Materials Science and Engineering, 1-7. doi:10.1088/1757-899X/372/1/012048

Jiang, J., Wang, Y., Chen, G., Liu, J., Li, Y., Luo, S., (2012). Comparison of mechanical properties and microstructure of AZ91D alloy motorcycle wheels formed by die casting and double control forming. Materials & Design, 40: 541-549. doi:10.1016/j.matdes.2012.04.029

Kainer, K. (2004). Rapid Solidification and Special Processes for Processing Magnesium Alloys. Hoboken: In: Kainer, K.U., Ed., Magnesium-Alloys and Technology, Wiley, 164-183.

Kaneko, T. S. (2003). Automotive applications of magnesium alloys. Materials Science Forum, Vol.419 67272.

Karim, H. K. (2022). Effect of design and material on structural rigidity of automobile wheel-An optimisation approach. J. Phys. Conf. Ser, 2222:012007. doi:10.1088/1742-6596/2222/1/012007

Khatkar, S. (2023). Hybrid magnesium matrix composites: A review of reinforcement philosophies, mechanical and tribological characteristics. Rev. Adv. Mater. Sci, 62:1-15. doi:10.1515/rams-2022-0294

Kulekci, M. (2008). Magnesium and Its Alloys Applications in Automotive Industry. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 39, 851-865. https://doi.org/10.1007/s00170-007-1279-2

Laccourreye, O. M. (2019). French scientific medical journals confronted by developments in medical writing and the transformation of the medical press. European Annals of Otorhinolaryngology, Head and Neck Diseases, Volume 136, Issue 6, Pages 475-480.

Li, G. (2014). Study on Superplastic Forming of Preformed Blank for Magnesium Alloy Wheel. Forging & Stamping Technology, 39, 71-74.

Li, J. L. (2018). Three coordination compounds based on tris (1-imidazolyl) benzene: Hydrothermal synthesis, crystal structure and adsorption performances toward organic dyes. Catalysts, 8 (2), p. 89. https://doi.org/10.1016/j.poly.2017.10.011

Li, Q. L. (2021). Thermodynamics and kinetics of hydriding and dehydriding reactions in Mg-based hydrogen storage materials. J. Magnes. Alloys, 9 (6) (pp. 1922-1941.

Liu, B. Y. (2023). Development and application of magnesium alloy parts for automotive OEMs: A review. Journal of Magnesium and Alloys, Volume 11, Issue 1, Pages 15-47. https://doi.org/10.1016/j.jma.2022.12.015

Liu, Z. L. (2015). Application of Micro-Arc Oxidation Technology in Die Magnesium Alloy Wheels in Mass Production. Trans Tech Publications Ltd. doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.667.15

Long, G. M. (2005). Ammoniation Technology For Dehydration of Hydrated Magnesium Chloride in China, Materials Science Forum, Trans Tech Publications Ltd pp. 95-98.

Luo, A. S. (2022). Alloy development and process innovations for light metals casting. J. Mater. Process. Technol., 306:117606. doi:10.1016/j.jmatprotec.2022.117606

Malik, A. W. (2021). Post deformation analysis of the ballistic impacted magnesium alloys, a short-review. J. Magnes. Alloys, 9 (5), pp. 1505-1520.

Minggao, O. (2006). Strategy and Measures for China's Energy-saving and New Energy Vehicle. Automotive Engineering, Vol.28 317-321.

Molaei, M. B.-A. (2021). Improving the wear resistance of plasma electrolytic oxidation (PEO) coatings applied on Mg and its alloys under the addition of nano- and micro-sized additives into the electrolytes: a review. J. Magnes. Alloys, 9 (4) pp. 1164-1186.

Mordike, B. E. (2001). Magnesium: Properties-applications-potential. Materials Science and Engineering: A, Volume 302, Issue 1,15 Pages 37-45.https://doi.org/10.1016/S0921-5093(00)01351-4

Nguyen, D. S. (2017). Magnesium stannide as a high-capacity anode for magnesium-ion batteries. J. Power Sources, 368, pp. 11-17. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.09.054

Papenberg, N. G. (2020). Mg-alloys for forging applications-A review. Materials, 13:985. doi:10.3390/ma13040985

Paramsothy, M. G. (2011). Carbon Nanotube Addition to Simultaneously Enhance Strength and Ductility of Hybrid AZ31/AA5083 Alloy. Materials Sciences and Applications, 2(1), 20-29.

Peng, F. Z. (2021). Recent progress in superhydrophobic coating on Mg alloys: a general review. J. Magnes. Alloys, 9 (5) pp. 1471-1486.

Polmear, I. (1996). Light Alloys: Metallurgy of the Light Metals. Newyork: 3rd Edition, Halsted Press .

Polmear, I. (1999). In Magnesium and magnesium alloys. USA: ASM Specialty Handbook.

Reguła, T. B.-G. (2008). An Assessment Of The Possibilities To Shape The Mechanical Properties Of Cast Az91 Magnes. Prace Instytutu Odlewnictwa, XLVIII (1): 39-45.

Shang, Y. P. (2021). Mg-based materials for hydrogen storage. J. Magnes. Alloys, 9 (6) pp. 1837-1860.

Shi, Z. C. (2021). Crystallography of precipitates in Mg alloys. J. Magnes. Alloys, 9 (2) pp. 416-431.

Song, J. C. (2022). Research advances of magnesium and magnesium alloys worldwide in 2021. Journal of Magnesium and Alloys, Volume 10, Issue 4, Pages 863-898.

Şık, A. (2010). Sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilen magnezyum levhaların mekanik özelliklerinin incelenmesi. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, Cilt: 14 Sayı: 2, 134-140,.

Şık, A. K. (2003). Examination of Mechanical Properties of Magnesium Plates Joined By Friction Stir Welding. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, sa.3, ss.93.

Tang, X. G. (2015). Cryst. Res. Technol., 50 (3) pp. 203-209. https://doi.org/10.1002/crat.201400122

Thirumurugan, M. K. (2013). precipitation hardening behavior of AZ91 magnesium alloy. Transactionof Nonferrous Metals Society of China, 23(6):1595–1601. https://doi.org/10.1016/S1003-6326(13)62636-9

USGS. (2022). Mineral Commodity Summaries 2022 Mineral Commodity Summaries 2022 By: U.S. Geological Survey https://doi.org/10.3133/mcs2022.

Wang, M. (2023). An Industrial Perspective on Magnesium Alloy Wheels: A Process and Material Design. Materials Sciences and Applications, 14(01):20-44.

Wang, Q. Z. (2010). New extrusion process of Mg alloy automobile wheels. Trans. Nonferrous Met. Soc. China Engl. Ed., 20:s599-s603. doi:10.1016/S1003-6326(10)60546-8

www.ipeofficial.com. (2024). Erişim Tarihi: 07.Ekim.2024). www.ipeofficial.com.

Xie, J. Z. (2021). Towards developing Mg alloys with simultaneously improved strength and corrosion resistance via RE alloying. J. Magnes. Alloys, 9 (1) pp. 41-56.

Xiuqing, Z. L. (2006). Mechanical Properties and Damping Capacity of Magnesium Matrix Composites. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing.

Zhang, Z. Z. (2015). Application of Micro-Arc Oxidation Technology in Die Magnesium Alloy Wheels in Mass Production. Key Engineering Materials, 667, 15-21. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.667.15

Zhao, D. (2014). The FEA Comparison of the Front Sub Frame in a Car between JDM2 Magnesium and steel. Applied Mechanics and Materials, 538 Trans Tech Publications Ltd pp. 87-90. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.538.87

Zhenming, L. L. (2016). Fatigue Properties of Cast Magnesium Wheels. Metallurgical and Materials Transactions A, Volume 47, pages 4239-4257. doi:10.1007/s11661-016-3550-3

Zhu, W. Z. (2010). Dynamic Design Method for Magnesium Alloys Wheel of New Energy Vehicles. Advanced Materials Research, (Volumes 118-120) 930-934.



Karbon Ayak İzinin Bibliyometrik Değerlendirmesi

***Abdullah Yinanç*[1]**

[1] Doç. Dr., Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Orcid: 0000-0002-8144-8266

GİRİŞ

Karbon ayak izi ve sera gazı emisyonu hesaplamaları, doğal dengeyi bozan ve küresel olarak en çok konuşulan konulardan biri haline gelen insan faaliyetlerinin doğal kaynakları bilinçsizce tüketmesinin yol açtığı sorunları ele almanın bir yolu olarak son yıllarda giderek daha önemli hale gelmiştir. Faaliyetlerin neden olduğu çevresel zararın miktarı "karbon ayak izi" olarak bilinir. Diğer tüm kirleticiler belirli çarpanlarla çarpılarak aynı birim hesabı CO_2 eşdeğeri cinsinden ifade edilir. Atmosferi ortama atılmış farklı tüm sera gazı miktarları ve bunların oluşturduğu toplam etkinin analizine dayanır. Bura da; metrik değerlendirme birincil (doğrudan) ve ikincil (dolaylı) karbon ayak izi hesaplaması olarak iki kategoride yapılmıştır. Kullandığımız ürünlerin üretiminden ve nihai olarak bozulmasından kaynaklanan dolaylı karbondioksit emisyonları ikincil karbon ayak izi ile ölçülürken, birincil karbon ayak izi, evsel enerji tüketimi ve ulaşım (otomobiller ve uçaklar gibi) dahil olmak üzere doğrudan fosil yakıtların yanmasından kaynaklanan CO_2 emisyonlarının bir ölçüsüdür (Özsoy, 2015). İnsan taleplerini karşılamak için gerçekleştirilen çeşitli üretim ve tüketim faaliyetlerinin çevre üzerindeki etkisi olarak bilinen karbon ayak izi, insanların veya ulusların tüketim alışkanlıklarının evreni ne ölçüde etkilediğini değerlendirmek ve karşılaştırmak ve hem küresel hem de bölgesel sorunları ele almak için çok önemli bir ölçüt olarak görülebilir (Lynas, 2009).

Karbon ayak izinin tanınması ve üzerinde yoğunlaşılması çok önemli bir konudur ve karbon ayak izinin takibi ve hesaplanmasının birçok nedeni vardır. Karbon ayak izinin oranlarını ölçebilmek ve hesaplamak, çevresel zarara ve küresel ısınmaya katkıda bulunan unsurları analiz edebilmek demektir(Neale, 2009: 20-21). Bir bireyin karbon ayak izine katkıda bulunan eylemleri Şekil 1'de gösterilmektedir.



Şekil 1: Bir Kişinin Karbon Ayak İzini Oluşturan Etmenler
Kaynak: https://epy.com.tr/

Karbon ayak izinin meydana gelmesinde birçok etken önemli olmakla birlikte esasen %50'den fazla bir kısmını; doğalgaz, petrol, kömür gibi fosil kökenli yakıtlar, eğlence, gezme ve tatil amaçlı kullanılan her türlü ulaşım araçları, kamusal alandaki faaliyetler ile elektrik tüketimi oluşturmaktadır.

"Karbon ayak izi" terimi, sera gazı emisyonları açısından ölçülen ve karbondioksit birimi cinsinden ifade edilen, bireysel faaliyetlerin yarattığı çevresel zarar miktarını ifade eder Bekiroğlu, 2011). Karbon ayak izi, zaman içinde canlıların kütlesine ve ayak büyüklüğüne bağlı olarak değişen bir izdir (Özer, 2002). Bir kişinin karbon ayak izini hesaplamak, bir yıl boyunca atmosfere ne kadar CO_2 saldığını bulmayı içerir. Karbon ayak izi, ulaşım, ısınma, yeme, içme ve diğer faaliyetler ve ürünler sonucunda üretilen ve tüketilen karbon miktarına göre belirlenmektedir. Bireylerin küresel ısınmaya ne ölçüde katkıda bulundukları karbon ayak izleri ile belirlenir. Başka bir ifadeyle karbon ayak izi, insanlar, kuruluşlar veya genel olarak herhangi bir ürün tarafından çevreye salınan sera gazlarının oranıdır. Karbon ayak izinin hesaplanması, araçların kat ettiği toplam mesafe, ısınma için tüketilen enerji vb. dahil olmak üzere bir dizi faktörü içerir. Bu bağlamda; iki bileşeni olan karbon ayak izinin birincil (doğrudan) ve ikincil (dolaylı) ayak izlerinin belirlenmesinin dikkat yapılması gerekmektedir. Fosil yakıtların kullanımı ile ulaşım, evsel enerji kullanımı ve emisyondan kaynaklanan potansiyel birincil ayak izi CO_2 miktarı ve günlük olarak kullandığımız ürünlerin üretimine ve nihai olarak bozulmasına kadarki zamanda oluştuğu ikincil ayak izi esasen belirli bir zamandaki atmosfere salınan CO_2'yi ölçmektedir (Kaypak, 2013).

Karbon ayak izleri hem kişisel hem de kurumsal olarak hesaplanabilir. İnsanların eylemleri sonucunda ürettikleri emisyon miktarının kişisel karbon ayak izi olarak bilindiği ve evlerde ısınma, elektrik ve diğer ihtiyaçlar için kullanılan yakıtların birincil karbon ayak izi, insanların kullandıkları ürünlerin tüm yaşam döngüsünü yada üretim sürecinden son haline kadar ki dolaylı karbondioksit emisyonları etkisinin ise "İkincil karbon ayak izi" terimi olduğu (Kitzes vd., 2007) tarafından ifade edilmiştir. Kurumsal karbon ayak izi hesaplaması temelde üç aşamadan oluşur ve bu aşamalar arasında metodik bir değerlendirme de yer alır. Bu aşamalardan ilkinde, karbon ayak izine neden olan tüm eylem ve işlemlerin toplamı yer almaktadır. Kullanılan elektrik enerjisinden kaynaklanan emisyon miktarı ile kurumların iklimlendirme sistemlerinden kaynaklanan emisyonlar ikinci aşamada dikkate alınmaktadır. Üçüncü ve son aşama ise kurumun faaliyetlerinden kaynaklanan ancak kendi faaliyetlerinden kaynaklanmayan emisyon miktarıdır (Turanlı, 2015).

İklim değişikliği, küresel ısınma ve bunun sonucunda ortaya çıkan doğal yaşam kaybı, insan faaliyetlerinin doğal dünyada yarattığı karbon ayak izinin karşılığıdır. Ayakların kütlesine ve büyüklüğüne bağlı olarak, herhangi bir canlının bastığı noktaya uygulanan basınç, dönemsel olarak değişen bir ize neden olmakta ve isimlendirmeye temel teşkil eden "Ayak İzi" bölümünü oluşturmaktadır (Özer, 2002: 82).

İnsan eliyle yapılan çalışmaların, sürdürülebilirliğin sağlanmasında geri döndürülemez tehditler oluşturduğu ve bu tehditler için önlemler almak önemli süreçtir (Cansaran, 2020). Sürdürülebilir bir varoluş için, çevrenin ve küresel ısınmanın getirdiği iklim değişikliğinin karbon izini azaltmak amacıyla şu eylemler gerçekleştirilebilir (Kumaş vd., 2019):

- ✓ Çevre sorunları ve iklim değişikliği konusunda farkındalığı artırmak için eğitim seminerleri ve programları planlanmalıdır.
- ✓ Karbon emisyonlarını azaltmak için düzenli olarak ağaçlandırma çalışmaları yapılmalıdır.
- ✓ Geri dönüştürülmüş malzemelerin ve çevre dostu ürünlerin kullanımını teşvik etmek için girişimler geliştirilmelidir.
- ✓ Su, doğal gaz, çöp, enerji, ısınma ve karbon emisyonlarının azaltılması önemlidir.
- ✓ Alternatif enerji kaynaklarının kullanımının teşvik edilmesi ve bu alandaki çabaların artırılması önemlidir.
- ✓ Kamu işletmelerinin kendi elektriklerini üretmeleri mümkün olmalıdır.

Karbon ayak izi hem kişisel hem de kurumsal olan, özel ve kamu tüm kesimleri doğrudan ilgilendiren ''küresel'' bir sorundur. Bu sebeple de öncelikle yukarıdaki konuların etkinleştirilmesi gerekmektedir.

Bibliyometri, nicel analize odaklanan ve kitaplar, dergiler ve lisansüstü tezler de dahil olmak üzere yayınlanmış çalışmaları inceleyerek bir konunun genel görünümü hakkında içgörü sağlayan bir disiplindir (Karadağ, 2009). Bibliyometrik çalışmalar, yayınların belirli özelliklerini inceleyerek farklı sonuçlar ortaya koymaktadır (Murathan vd., 2020: 160). Bu çalışma, Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'ndeki lisansüstü tezleri analiz etmektedir. Çalışma ilk olarak karbon ayak izini incelemekte ve ardından tezlerin bibliyometrik analizini yapmaktadır. Amaç, bu konunun son yıllarda artan önemini ortaya koymaktır. Ayrıca bu çalışmanın amaçlarından biri de önemi giderek artan bu kavramın ulusal literatürdeki

gelişimini teşvik etmek ve farkındalık yaratmaktır. Çalışmanın amaçları doğrultusunda, ilk olarak 1965 yılında Derek J. De Solla tarafından önerilen bibliyometrik analiz, doktora tezlerinin yıllara göre dağılımını, konuların dağılımını, yapılan çalışmaların türlerini, bu çalışmaların yapıldığı kurumları, ilgili enstitüleri ve çalışmalarda kullanılan dilleri göstermektedir.

YÖNTEM

Bu çalışmada bibliyometrik analiz yöntemi kullanılmıştır. Bu teknik, mevcut verileri yoğunlaştırmak, standartlaştırmak ve değerlendirmek için kullanılır (Öğülmüş, 1991: 215; Yılmaz, 2018: 33-33). Bibliyometrik analiz ilk olarak 1965 yılında Derek J. De Solla tarafından ortaya atılmıştır. Bu yöntem, konunun gelişimini çeşitli değişkenler bağlamında aydınlatarak ve sonuçları kısa ve net bir şekilde sunarak konunun gelişimini (Boyack vd., 2005). Yapılan araştırmaların yılları, konuları, türleri, üniversiteleri, enstitüleri ve dilleri hakkında ayrıntılı bilgi sağlar. Bu çalışmada veriler 01 Kasım 2024 tarihinde Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanında 'karbon ayak izi' başlığı altında taranmıştır. Tarama sırasında toplam 64 doktora tezi tespit edilmiş ve tüm sonuçlar çalışmaya dahil edilmiştir.

Elde edilen veriler şu çerçevede analiz edilecektir:

- ✓ Karbon ayak izi üzerine yapılan çalışmaların yıllara göre dağılımı,
- ✓ Karbon ayak izi üzerine yapılan çalışmaların konulara göre dağılımı,
- ✓ Karbon ayak izi üzerine yapılan çalışmaların üniversitelere göre dağılımı,
- ✓ Karbon ayak izi üzerine yapılan çalışmaların türlerine göre dağılımı,
- ✓ Karbon ayak izi üzerine yapılan çalışmaların enstitülere göre dağılımı,
- ✓ Karbon ayak izi üzerine yapılan çalışmaların yazım dillerine göre dağılımı,

ANALİZ VE BULGULAR

Bu bölümde araştırmada elde edilen verilerin bir değerlendirilmesi sunulmuştur.

Tablo 1: Tezlerin Yıllara Göre Dağılımı

Yayınlandığı Yıl		
	N	%
2012	1	1.6
2013	1	1.6
2014	-	-
2015	2	3.1
2016	2	3.1
2017	3	4.6
2018	2	3.1
2019	8	12.5
2020	6	9.4
2021	1	1.6
2022	8	12.5
2023	15	23.4
2024(ekim)	15	23.4
Toplam	64	100

Tablo 1'e göre karbon ayak izi konulu tezlerin ülkemizde yazılmaya başladığı ilk tarih 2012'dir. En fazla tezin yazıldığı yıllar 2023 ve 2024'tür. 2024'ün sadece ekim ayına kadar yapılan çalışmalar dahil edildiğinden yıl sonuna kadar bu sayının artacağı düşünülmektedir.

Tablo 2. Tezlerin Konularına Göre Dağılımı

Konu	n	%
Çevre Mühendisliği	25	39
Enerji	5	8
Ziraat	4	6
Ekonomi	3	5
İnşaat Mühendisliği	3	5
Endüstri ve Endüstri Mühendisliği	2	3
Eğitim Öğretim	2	3
İşletme	2	3
Mimarlık	2	3
Makine Mühendisliği	2	3
Petrol ve Doğalgaz Mühendisliği	1	1.6
Jeodezi ve Fotogremetri	1	1.6
Aile Hekimliği	1	1.6
Şehircilik ve Bölge Planlama	1	1.6
Ormancılık ve Orman Mühendisliği	1	1.6
Biyoteknoloji	1	1.6
Metalurji Mühendisliği	1	1.6
Meteoroloji	1	1.6

Ekonometri	1	1.6
Trafik	1	1.6
Bankacılık	1	1.6
Beslenme ve Diyatetik	1	1.6
Güzel Sanatlar	1	1.6
Denizcilik	1	1.6
Toplam	64	100

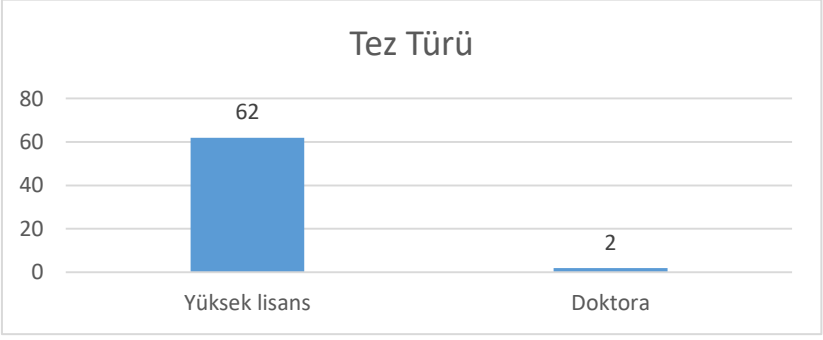
Tablo 2'de karbon ayak izine ait farklı konulardaki tezlerin sayısı ve her bir konudaki tezlerin yüzde dağılımı gösterilmektedir. Tüm tezlerin %39'u ile çevre mühendisliği en çok araştırma yapılan alan olmuştur. Enerji, tarım ve ekonomi diğer konulara göre daha düşük yüzdelere sahiptir ve bu da çalışma yoğunluğunun ve ilginin alanlar arasındaki dağılımını yansıtmaktadır.

Tablo 3. Tezlerin Üniversitelere Göre Dağılımı

Üniversiteler	N	%
Ortadoğu Teknik Üniversitesi	5	8
İstanbul Teknik Üniversitesi	5	8
Süleyman Demirel Üniversitesi	4	6
Yıldız Teknik Üniversitesi	3	5
Çukurova Üniversitesi	3	5
Niğde Üniversitesi	3	5
Çanakkale On Sekiz Mart Üniversitesi	2	3
Sakarya Üniversitesi	2	3
Akdeniz Üniversitesi	2	3
Bursa Uludağ Üniversitesi	2	3
Aksaray Üniversitesi	1	1.6
Ankara Üniversitesi	1	1.6
Atatürk Üniversitesi	1	1.6
Aydın Adnan Menderes Üniversitesi	1	1.6
Bandırma On Yedi Eylül Üniversitesi	1	1.6
Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi	1	1.6
Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi	1	1.6
Çankırı Karatekin Üniversitesi	1	1.6
Ege Üniversitesi	1	1.6
Gazi Üniversitesi	1	1.6
Gaziantep Üniversitesi	1	1.6
Gebze Teknik Üniversitesi	1	1.6
Giresun Üniversitesi	1	1.6
Hitit Üniversitesi	1	1.6
Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi	1	1.6
İstanbul Sabahattin Zaim Üniversitesi	1	1.6
İstanbul Şehir Üniversitesi	1	1.6
İstanbul Üniversitesi	1	1.6

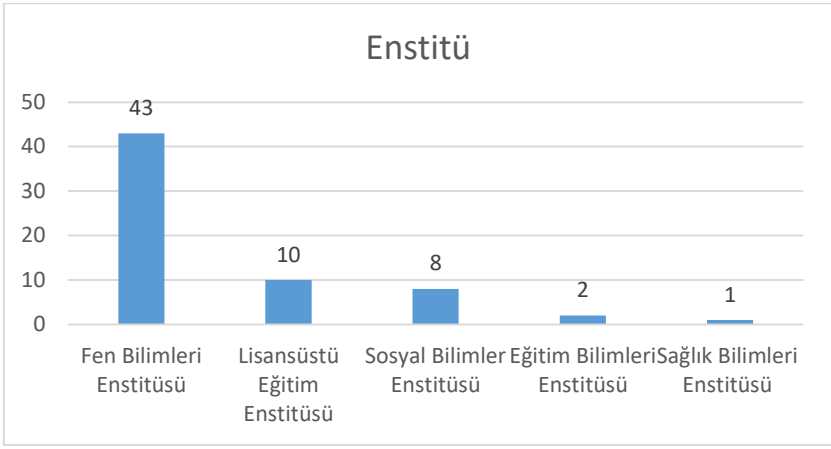
İzmir Katip Çelebi Üniversitesi	1	1.6
Kocaeli Üniversitesi	1	1.6
Konya Teknik Üniversitesi	1	1.6
Manisa Celal Bayar Üniversitesi	1	1.6
Mersin Üniversitesi	1	1.6
Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi	1	1.6
Munzur Üniversitesi	1	1.6
Necmettin Erbakan Üniversitesi	1	1.6
Sivas Üniversitesi	1	1.6
Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi	1	1.6
Trakya Üniversitesi	1	1.6
Uşak Üniversitesi	1	1.6
Toplam	64	100

Tablo 3, çeşitli üniversitelerde karbon ayak izi konusunda yapılan tezlerin sayısını ve toplam tezler içindeki yüzde dağılımını göstermektedir. Orta Doğu Teknik Üniversitesi ve İstanbul Teknik Üniversitesi %8'er oranla en yüksek tez sayısına sahiptir. Diğer üniversiteler daha düşük bir tez yüzdesine sahiptir ve bu da akademik çabanın Türkiye'deki üniversiteler arasında ne kadar yaygın olduğunu göstermektedir.



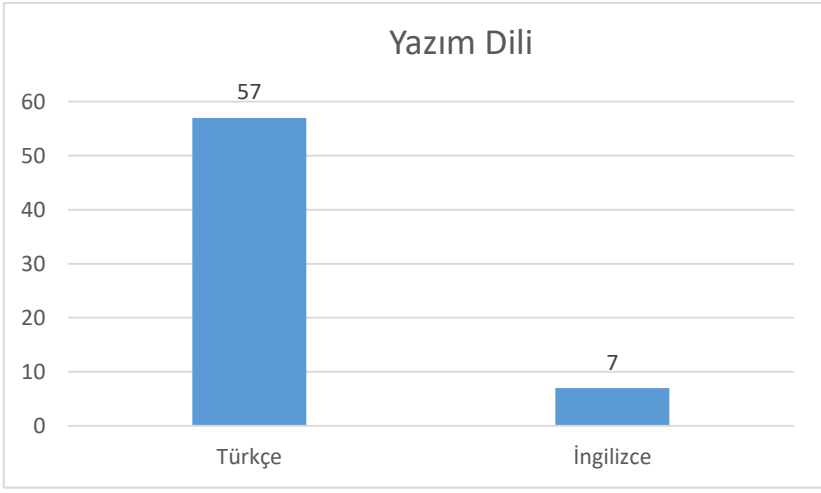
Şekil 2. Tezlerin Göre Dağılımı

Karbon ayak izi konusunda yapılan doktora ve yüksek lisans tezlerinin sayısal dağılımı şekil 2'de gösterilmektedir. Tezlerin yalnızca %3,13'ü doktora düzeyindeyken, %96,88'i yüksek lisans düzeyindedir. Bu durum, yüksek lisans derecelerinin doktora derecelerinden daha yaygın olduğunu göstermektedir.



Şekil 3. Tezlerin Enstitülere Göre Dağılımı

Karbon ayak izi tezlerinin çeşitli enstitüler arasındaki yüzde dağılımı şekil 3'te gösterilmektedir. Fen Bilimleri Enstitüsü tezlerin %67,19'unu oluştururken, %15,63'ü Eğitim Enstitüsü'nden, %12,5'i ise Sosyal Bilimler Enstitüsü'nden gelmiştir. Sağlık Bilimleri Enstitüsü ve Eğitim Bilimleri Enstitüsü'ndeki tez oranlarının düşüklüğü, çeşitli disiplinlerde yürütülen bilimsel araştırmaların niteliğindeki eşitsizliği göstermektedir.



Şekil 4. Tezlerin Yazım Diline Göre Dağılımı

Karbon ayak izi tezlerinin yazım diline göre dağılımı şekil 4'te gösterilmektedir. Tezlerin %10,94'ü İngilizce, %89,06'sı ise Türkçe yazılmıştır.

SONUÇ

Çevresel kirliliğin çeşitli açılardan incelenmesiyle, ekolojik ayak izi olarak da bilinen karbon ayak izi dikkat çekebilmektedir. Bireyleri çevre konusunda dikkatli olmaya teşvik eder. Karbon ayak izi, çevreye yönelik tehditlerin ölçülebilir ve somut kanıtlarını sunmaktadır. Çevre bilinci açısından karbon ayak izi çok önemli bir veri tabanıdır (Kaypak, 2013: 154). Daha az enerji kullanarak, geri dönüşümü teşvik ederek ve yenilenebilir enerji kaynaklarına geçerek karbon ayak izi azaltılabilir. Bu durum sürdürülebilir bir gelecek için oldukça önemlidir.

Bu çalışma, bibliyometrik analiz tekniklerini kullanarak, Ulusal Tez Merkezi'nde yayınlanan karbon ayak izi konulu lisansüstü tezlerdeki ilişkiyi araştırmayı amaçlamaktadır. Karbon ayak izi üzerine yapılan çalışmaların yıllara, konulara, üniversitelere, enstitülere, türlerine ve yazım dillerine göre nasıl dağıldığını ortaya çıkarmak çalışmanın öncelikli hedefidir. Bu bağlamda, Ulusal Tez Merkezi veri tabanında yapılan taramalarda 64 lisansüstü tezin analizi yapılmıştır. Çalışmanın sonuçları, karbon ayak izi üzerine yapılan akademik araştırmaların yaygınlığı hakkında kapsamlı bir anlayış sunmaktadır. Araştırmanın sonuçlarının şu şekilde yorumlamak mümkündür:

Türkiye'de karbon ayak izi üzerine ilk tez 2012 yılında yazılmıştır. Bu tarih, karbon ayak izi kavramının Türkiye'de akademik çevrelerde önem kazanmaya başladığını ve farkındalığın gelişmeye başladığını göstermektedir. 2023 ve 2024 yılları en fazla tezin üretildiği yıllar olarak kayıtlara geçmiştir. 2024 yılı verileri Ekim ayına kadar olan araştırmaları kapsamaktadır ve yıl sonuna kadar artış beklenmektedir. Bu artış eğilimi, karbon ayak izi konusundaki akademik çalışmaların ülkemizde ilerlediğini göstermektedir. Gelecekte daha fazla araştırma yapılacağı düşünülmektedir.

Karbon ayak izi üzerine yapılan tezler öncelikle çevre mühendisliği alanından kaynaklanmaktadır. Çevre mühendisliğinin bu alandaki önemli rolü, bu disiplinin karbon ayak izinin çevresel etkilerini anlamak ve hafifletmek için gerekli olduğunu göstermektedir. Enerji, tarım ve ekonomi gibi sektörlerde de giderek artan bir ilgi söz konusudur.

Araştırmanın bir diğer sonucu, Orta Doğu Teknik Üniversitesi ve İstanbul Teknik Üniversitesi'nin yazılan toplam tezlerin %8'ini oluşturarak bu üniversitelerin karbon ayak izi konusunda en büyük paya sahip olduğu görülmektedir. Diğer üniversitelerdeki tezlerin daha düşük yüzdelerine rağmen, karbon ayak izi

konusundaki araştırmaların ülke çapında giderek yaygınlaştığını ve birkaç üniversitenin bu alana katkıda bulunduğunu göstermektedir. Bu dağılım, karbon ayak izi konusunun Türkiye'deki üniversiteler arasında ilgi görmeye başladığını ve diğer kurumların da bu alanda gelecekte yapılacak araştırmalara katılabileceğini göstermektedir.

Çalışmanın bir diğer bulgusu, karbon ayak izi konusundaki çalışmaların yüksek lisans düzeyinde yoğunlaştığını göstermektedir. Ayrıca, doktora tezlerinin sayısının az olması, bu alanda daha derin araştırma ve uzmanlaşma gerektiren çok fazla çalışma olmadığını bu konudaki çalışmaların teşvik edilmesi gerektiğini göstermektedir.

Araştırma bulguları, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün karbon ayak izi araştırmalarında %67,19 gibi önemli bir oranla lider olduğunu göstermektedir. Bu durum çevre bilimi, klimatoloji ve mühendislik gibi alanların karbon ayak izi araştırmalarında giderek daha fazla öne çıktığını ve Fen Bilimleri Enstitüsü'nün bu konudaki akademik araştırmaları titizlikle sürdürdüğünü göstermektedir. Eğitim Enstitüsü ve Sosyal Bilimler Enstitüsü'nün sırasıyla %15,63 ve %12,5'lik katkıları, karbon ayak izi konusunun teknik disiplinlerin ötesine geçerek sosyal bilimler ve eğitim alanında da önem kazandığına işaret etmektedir. Sonuç olarak, karbon ayak izi konusundaki akademik araştırmaların ağırlıklı olarak fen bilimlerinde yoğunlaştığını, ancak sosyal bilimler ve eğitim alanında artan ilgiye rağmen bu tür çalışmaların bazı disiplinlerde kısıtlı kaldığını göstermektedir.

Araştırmanın bir diğer bulgusuna göre, tezlerin yaklaşık %90'ınn Türkçe dilinde yazıldığıdır. İngilizce dilinde yazılan tezlerin az sayıda olması, küresel bilim çevrelerinde yeteri kadar temsil edilmediğini ortaya koymaktadır. Uluslararası alanda etki edebilmek ayrıca küresel bilgi ağına entegre olmak için İngilizce dilindeki tezlerin sayısının artırılması önem arz etmektedir.

Gelecekteki araştırmalar, karbon ayak izi konusunun doktora düzeyinde kapsamlı bir şekilde incelenmesine öncelik vermeli ve disiplinler arası araştırmaları teşvik etmelidir. Sosyal bilimler, eğitim, ekonomi ve sağlık gibi farklı alanlarda yapılacak araştırmalar, karbon ayak izlerinin karmaşık etkilerinin daha iyi anlaşılmasını sağlayacaktır. Ayrıca, İngilizce yazılan doktora tezlerinin sayısının artırılması, Türkiye'deki araştırmaların uluslararası akademik alanlara entegrasyonuna katkıda bulunabilir ve dünyada bilginin yayılmasına katkıyı artırabilir. Bu bağlamda, karbon ayak izinin küresel iklim değişikliği ve sürdürülebilir kalkınma hedefleri doğrultusunda bütüncül bir bakış açısıyla ele alınması hem yerel hem de uluslararası düzeyde sürdürülebilir çözümler üretilmesine yardımcı olacaktır.

KAYNAKÇA

Bekiroğlu, O. (2011). Sürdürülebilir kalkınmanın yeni kuralı: Karbon ayak izi. *Çevrim-içi: http://www. emo. org. tr/ekler/49c17cab08ed10e_ek. pdf],* (Erişim Tarihi: 11.09.2024)

Boyack, K. W., Klavans, R., & Börner, K. (2005). Mapping the backbone of science. *Scientometrics, 64*(3), 351-374.

Cansaran, D. (2020). Sürdürülebilir Yaşam ve Kent, Çevre ve İnsan (Editör: Arzu Cansaran) Eğiten Kitap, (ISBN: 978-625-7083-76-8), s:129-151.

Karadağ, E. (2009). Eğitim bilimleri alanında yapılmış doktora tezlerinin tematik açıdan incelemesi. *Ahi Evran Üniversitesi Eğitim Fakültesi Dergisi, 10*(3), 75-87.

Kaypak, Ş. (2013). Ekolojik ayak izinden çevre barışına bakmak. *Türk Bilimsel Derlemeler Dergisi, 6*(1), 154-159.

Kitzes, J., Peller, A., Goldfinger, S., & Wackernagel, M. (2007). Current methods for calculating national ecological footprints accounts. *Science for Environment and Sustainable Society, 4*(1), 1-9.

Kumaş, K., Akyüz, A., Zaman, M., & Güngör, A. (2019). Sürdürülebilir bir çevre için karbon ayak izi tespiti: MAKÜ Bucak Sağlık Yüksekokulu örneği. *El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi, 6*(1), 108-117.

Lynas M., (2009). Karbon ayak iziniz. Neşet Kutluğ (1Çev.). İstanbul: Açık Radyo Kitapları, Nüfusun Ülkeler İçin Önemi ve Nüfus Artışı

Murathan, G., Murathan, F., & Bozyılan, E. (2020). "Fiziksel aktivite" konulu tezlerin bibliyometrik analizi (2002-2019). *Beden Eğitimi ve Spor Bilimleri Dergisi, 14*(2), 158-167.

Neale, J. (2009). *Küresel ısınmayı durduralım, dünyayı değiştirelim!* (Çev. Doğan Tarkan). İstanbul: Yordam Kitap.

Öğülmüş, S. (1991). İçerik çözümlemesi. *Ankara Üniversitesi Eğitim Bilimleri Fakültesi Dergisi, 24*(1), 213-228.

Özer, Z. (2002). Ekolojik ayak izleri. *Bilim ve Teknik Dergisi, 419*, 82-84.

Özsoy, C. E. (2015). Düşük karbon ekonomisi ve Türkiye'nin karbon ayak izi. *Hak İş Uluslararası Emek ve Toplum Dergisi, 4*(9), 1-15.

Turanlı, A. (2015). *Estimation of carbon footprint: A case study for Middle East Technical University* (Yüksek Lisans Tezi). Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Türkiye.

Yılmaz, F. (2018). İçerik analizi ile 2001-2017 dönemi lisansüstü tezlerinde iç girişimciliğin incelenmesi. *International Journal of Social and Humanities Sciences Research (JSHSR), 5*(28), 3332-3340.

BÖLÜM 22

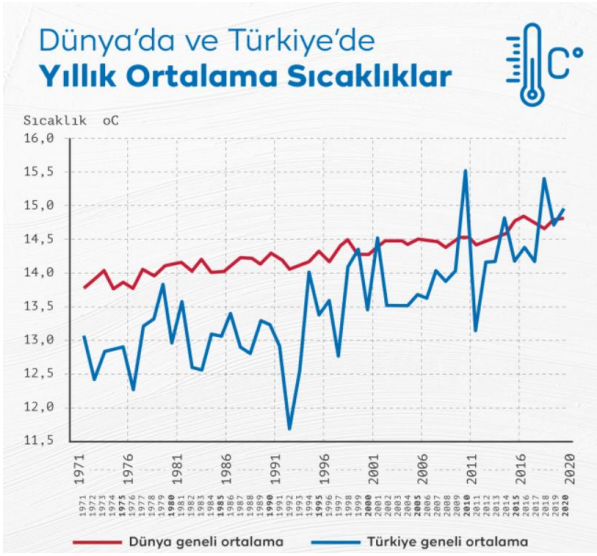
Dikey Tarım Teknolojilerinin Geleceği ve Coğrafi Bilgi Sistemlerinin Dikey Tarım Yer Seçimindeki Rolü

Büşra Yılmaz[1] & Murat Oturakçı[2] & Uğur Eliiyi[3] & Deniz Türsel Eliiyi[4]

[1] Arş. Gör., İzmir Bakırçay Üniversitesi, ORCID ID: 0009-0003-8050-8073
[2] Doç. Dr., İzmir Bakırçay Üniversitesi, ORCID ID: 0000-0001-5946-3964
[3] Doç. Dr., İzmir Bakırçay Üniversitesi, ORCID ID: 0000-0002-5584-891X
[4] Prof. Dr., İzmir Bakırçay Üniversitesi, ORCID ID: 0000-0001-7693-3980

1. GİRİŞ

Canlıların geleceği, rekor kıran sıcak hava dalgaları, aylar süren yangınlar, tarihin en büyük sıcaklık ve kasırgaları, toz fırtınaları, kuraklık ve su krizleri, ekilebilir tarım arazilerinin bozulması, güvenli gıdaya erişim, biyolojik çeşitliliğin kaybı ve türlerin yok olması ile tehdit altındadır. Küresel iklim değişikliği bu sorunların etkisini, şiddetini ve sayısını artıran en önemli faktördür (Birpınar, 2022). Şekil 1'de iklim krizinden kaynaklanan sıcaklık değişimleri gösterilmektedir.



Şekil 1. Dünya'da ve Türkiye'de Yıllık Ortalama Sıcaklıklar (Özacar, 2022)

İklim krizinin yanı sıra, ekonomik ve nüfus artışının yol açtığı talep artışı nedeniyle su sıkıntısının 2025 yılına kadar iki katına çıkması beklenmektedir (IPCC, 1997: 3). Küresel ısınma ve iklim değişikliği ile birlikte, çoğunlukla gelişmekte olan ve çöl bölgelerinde bulunan ülkelerin su kıtlığı sorunları daha da kötüleşecektir. Raporlara göre, sıcaklıkların 2 ila 2,5°C artması halinde 2,4 ila 3,1 milyar insan temiz su kaynaklarına erişimini kaybedebilir (EC-DGE, 2005: 25). Sıcaklıklar arttıkça, daha az yağış nedeniyle nehir debileri düştükçe, tuzlu su kıyı bölgelerindeki tatlı su kaynaklarına karıştıkça ve fırtınalar arttıkça su zorlukları ortaya çıkacaktır (Doğan & Tüzer, 2011).

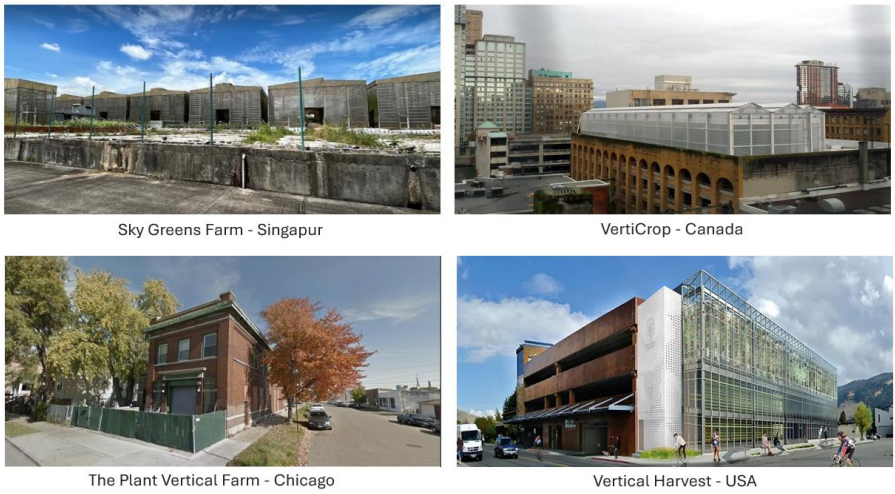
Su kaynaklarının tükenmesi, orman yangınları, kuraklık ve çölleşme ve diğer ekolojik bozulma biçimleri iklim krizinden kaynaklanmaktadır. Atmosferdeki sera gazı birikimindeki artışa bağlı olarak önümüzdeki yıllarda yaşanabilecek bir iklim değişikliği, başta kentler olmak üzere dünyada kurak ve yarı kurak alanlarına yeni sorunlar ekleyecek, tarımsal ve içme amaçlı su ihtiyacı daha da artabilecektir. Böylece kurak ve yarı kurak alanların genişlemesinin yanı sıra, daha uzun ve şiddetli yaz kuraklıklarının çölleşme, tuzlanma ve erozyonu hızlandırması beklenmektedir (Bayraç & Doğan, 2016). Woldemichael vd. (2020) dünya genelinde toprak verimliliği kaybının önde gelen nedenleri arasında en yüksek oran olan %33 ile kötü tarım uygulamaları, %20 ile ürün rotasyonunun olmaması, %18 ile ormansızlaşma, %17 ile toprak erozyonu ve %17 ile gübre eksikliğinin yer aldığını belirtmiştir.

Dikey tarım, azalan toprak verimliliği, toprak besin kaynaklarının tükenmesi, sınırlı sulama suyu ve iklim değişikliği gibi tarımla ilgili zorlukların ele alınmasına yardımcı olabilecek yeni bir yaklaşımdır (Texier, 2016). Dikey tarım, günümüzde tarım sektörünün karşılaştığı önemli zorluklara yenilikçi bir çözüm sunan bir yaklaşım olarak öne çıkmaktadır. Azalan toprak verimliliği, tarım arazilerinin kısıtlılığı ve iklim değişikliği gibi sorunlar, dünya genelinde gıda üretimini tehdit eden faktörler arasında yer almaktadır. Ayrıca, toprak besin kaynaklarının tükenmesi ve sınırlı sulama suyu, çiftçilerin sürdürülebilir bir şekilde ürün yetiştirmesini zorlaştırmaktadır. Dikey tarım, bu zorlukları aşmak için, özellikle kentsel alanlarda, daha az alanda daha fazla ürün elde etme imkânı sunarak tarımsal üretkenliği artırmayı hedefler. Bu yöntem, bitkilerin dikey sistemlerde, genellikle kapalı alanlarda yetiştirilmesini sağlarken, su ve besin maddeleri kullanımını da optimize eder. Böylece, geleneksel tarımın sınırlarını aşarak, çevre dostu ve sürdürülebilir bir gıda üretim modeli oluşturulmasına olanak tanır. Bu bağlamda, dikey tarım, gelecekteki tarımsal üretim yöntemleri arasında önemli bir yer edinerek, küresel gıda güvenliğine katkıda bulunma potansiyeli taşımaktadır.

2. DİKEY TARIM

Son yıllarda hızla gelişim gösteren dikey tarım, geleneksel tarım uygulamalarının karşılaştığı zorluklara yenilikçi bir çözüm sunarak, geniş tarlalar yerine gökdelenler, konteynerler ve diğer yapıların içinde bitkilerin yukarı doğru yerleştirilmesiyle gerçekleştirilen modern bir tarım yöntemi olarak dikkat çekmektedir. Bu yaklaşım, özellikle kentsel alanlarda sınırlı arazilerin etkin bir şekilde kullanılmasına olanak tanırken, aynı zamanda çevresel sürdürülebilirliği de teşvik etmektedir. Dikey tarımın en önemli avantajlarından biri, su tasarrufu sağlamasıdır; geleneksel tarım yöntemlerine kıyasla, dikey sistemlerde su kullanımı büyük ölçüde

azaltılabilmektedir. Bunun yanı sıra, toprak gerektirmemesi, tarım alanında büyük bir devrim yaratmakta ve şehirlerin kalabalık yapısında gıda üretimi için yeni alanlar açmaktadır. Bir diğer önemli faydası ise birim alandan alınan verimi artırmasıdır. Dikey tarım sistemleri, bitkilerin daha yoğun bir şekilde yerleştirilmesine olanak tanıyarak, aynı alanda daha fazla ürün yetiştirilmesini sağlar. Bu, özellikle gıda ihtiyacının giderek arttığı günümüzde büyük bir avantaj sunmaktadır. Ayrıca, dikey tarım, yıl boyunca sürekli olarak ürün yetiştirme imkanı sağlar; böylece mevsimsel dalgalanmalar ve iklim koşullarının olumsuz etkileri minimize edilir. LED aydınlatma sistemleri ve hassas iklim kontrolü sayesinde, bitkilerin ihtiyaç duyduğu koşullar sürekli olarak sağlanabilir. Tüm bu özellikleriyle dikey tarım, gelecekte tarım sektöründe önemli bir yer edinerek, hem gıda güvenliğine katkıda bulunacak hem de şehirlerin sürdürülebilir gelişimine destek olacaktır. (Cankül & Toprak, 2022). Şekil 2' de dünyada aktif olarak işleyen dikey tarım tesisleri görülmektedir.



Şekil 2. Dünyadaki Dikey Tarım Tesisleri

Dikey tarımda kullanılan çiftçilik yöntemleri vardır. Bu yöntemler dikey tarımın verimliliğini ve sürdürülebilirliğini arttırmaktadır. Tablo 1 bu yöntemleri açıklamaktadır.

Çiftçilik Yöntemi	**Temel Özellikler**	**Başlıca Faydalar**	**Ortak/Uygulanabilir Teknolojiler**
Hidroponik	Topraksız, yetiştirme ortamı olarak su kullanır.	Bitkilerin hızlı büyümesini sağlar; Toprak kaynaklı yetiştirme sorunlarını azaltır, hatta ortadan kaldırır; Gübre veya pestisit kullanımını azaltır.	Bilgisayarlı ve izleme sistemleri; Cep telefonları, dizüstü bilgisayarlar ve tabletler; Gıda yetiştirme uygulamaları; Uzaktan kontrol sistemleri ve yazılımları (uzaktan çiftçilik sistemleri); Otomatik raflar, istifleme sistemleri, hareketli bantlar ve yüksek kuleler; Programlanabilir LED aydınlatma sistemleri; Yenilenebilir enerji uygulamaları (güneş panelleri, rüzgar türbinleri, jeotermal, vb.); Kapalı devre sistemler, anaerobik sindiriciler; Programlanabilir besin sistemleri; İklim kontrolü, HVAC sistemleri; Su devridaim ve geri dönüşüm sistemleri; Yağmur suyu toplayıcıları; Böcek öldürme sistemleri; Robotlar
Aeroponik	Hidroponiğin bir çeşidi olan bu yöntemde bitki köklerine sis veya besin solüsyonları püskürtülür.	Yukarıda sayılan faydaların yanı sıra Aeroponik, daha az suya ihtiyaç duyar.	
Akuaponik	Su ürünleri yetiştiriciliğini (balık çiftçiliği) hidroponikle bütünleştiririr.	Bitkiler ve balıklar arasında simbiyotik ilişkiler yaratır; balık tanklarındaki besin açısından zengin atıkları hidroponik üretim yataklarını "gübrelemek" için kullanır; ve hidroponik yatak balık yaşam alanı için suyu temizler.	

Tablo 9. Çiftçilik yöntemleri (Mahdy & Hashem, 2023)

Yer seçimi, dikey tarımda en önemli kararlardan biridir. Alan uygunluğu ve gün ışığı mevcudiyeti gibi çeşitli faktörler, bir alanın seçimini önemli ölçüde etkiler. Bu nedenle, optimum alanı bulmak kritik öneme sahiptir. Bu sayede yüksek üretim seviyelerine, düşük maliyetlere ve verimli kaynak kullanımına sahip olunur. Yerel iklim koşullarıyla uyumlu bir yer seçmek enerji ve kaynak tasarrufu sağlar. Ayrıca, gün ışığı mevcudiyetiyle uyumlu bir alan, ürün yetiştirmek için de iyi bir yerdir.

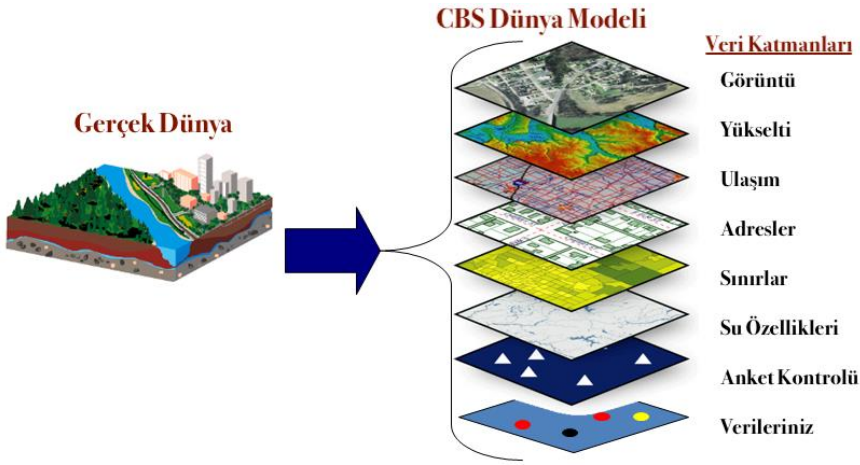
CBS farklı türdeki mekansal verileri entegre edip değerlendirebildiğinden, dikey tarım için alan seçimi için çok kullanışlı bir araçtır. İklim, kamu hizmetlerine erişim (su ve elektrik gibi) ve ulaşım ağlarına yakınlık gibi bir alanın uygunluğu için olmazsa olmaz olan unsurların değerlendirilmesini ve görselleştirilmesini sağlar. Çok kriterli karar verme (ÇKKV) olarak bilinen seçim süreci ise, bir karar vericinin en az iki kritere dayalı, sonlu veya sayılamayan alternatifler kümesinden bir seçenek seçmesi durumunda ortaya çıkar. ÇKKV için çeşitli yaklaşımlar geliştirilmiştir. Bu yaklaşımlar birbirlerinden çeşitli şekillerde farklılık göstermektedir. Uygun bir yaklaşımın seçilmesi, karar vericilerin bir çözüm bulurken karşılaştıkları sorunlardan biridir. Karar vericiler hangi yaklaşımın en iyisi olduğuna karar verirken sürecin özelliklerini ve problemin doğasını göz önünde bulundurmalıdır (Ersöz & Kabak, 2010). Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS), dijital haritalar üzerinde çeşitli bilgi katmanlarını bir araya getirerek, kullanıcıların lokasyonlarla ilgili karmaşık verileri analiz etmelerine olanak tanır. Bu sistemler, özellikle lojistik alanında, mevcut engelleri azaltmak ve operasyonel verimliliği artırmak için kritik bir rol oynamaktadır. CBS'nin sağladığı detaylı haritalama ve veri analizi, ideal konumların belirlenmesinde büyük avantajlar sunar. Örneğin, ulaşım ağları, depo yerleşimleri, müşteri talepleri ve altyapı durumu gibi birçok değişkeni göz önünde bulundurarak, en uygun lokasyonları belirlemek mümkün hale gelir. Bu bağlamda, CBS sistemlerinin bir Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) yöntemiyle birleştirilmesi, daha doğru ve kapsamlı sonuçlar elde edilmesini sağlar. ÇKKV yöntemleri, karar verme sürecinde farklı kriterlerin ve bu kriterlerin ağırlıklarının dikkate alındığı bir yaklaşımdır. Böylece, kullanıcılar yalnızca coğrafi verileri değil, aynı zamanda ekonomik, sosyal ve çevresel faktörleri de göz önünde bulundurarak daha bilinçli kararlar alabilirler. Örneğin, bir depolama tesisinin yerini belirlerken, ulaşım maliyetleri, çevresel etkiler ve yerel piyasa koşulları gibi faktörlerin tümü değerlendirilerek, en optimum çözüm elde edilir. Bu iki sistemin entegrasyonu, karmaşık karar alma süreçlerini daha yönetilebilir hale getirirken, işletmelerin stratejik planlamalarına da büyük katkı sağlar. Özetle, CBS ve ÇKKV yöntemlerinin bir arada kullanılması, hem lojistik engellerin aşıl-

masına yardımcı olur hem de organizasyonların operasyonel verimliliklerini artırarak rekabet avantajı sağlar. Böylece, hem zaman hem de maliyet tasarrufu sağlanırken, daha sürdürülebilir ve etkin bir lojistik yönetimi mümkün hale gelir.

3. COĞRAFİ BİLGİ SİSTEMLERİ (CBS)

CBS bir mekânsal bilgi oluşturma ve kullanma aracıdır. CBS, mekânsal veri ve bilgilerin toplanması, bakımı, depolanması, analizi, çıktısı ve dağıtımına yardımcı olan bilgisayar tabanlı bir sistem olarak tanımlanabilir. CBS, uygun şekilde kullanıldığında daha iyi, daha zengin ve daha güvenli bir hayat yaşamamıza yardımcı olabilir. Tüm CBS kullanıcıları, hangi özelliklerin önemli olduğunu ve kayda değer olduğunu seçebilir. CBS kullanımı artık birçok bağlamda gereklidir ve iş dünyası, hükümet, eğitim ve hayır kurumları için hayati araçlardır. CBS'nin suçla mücadele, nesli tükenmekte olan türlerin korunması, kirliliğin azaltılması, doğal felaketlerin yönetilmesi, salgın hastalıkların tedavisi ve halk sağlığının iyileştirilmesi gibi en acil toplumsal sorunlarımızın üstesinden gelmede yardımcı olduğu kanıtlanmıştır. CBS araçları bir araya getirildiğinde, kamu ve özel sektöre mal ve hizmet sağlanmasında yılda milyarlarca dolar tasarruf sağlamaktadır. Kanalizasyon, su, elektrik ve ulaşım ağları, günlük yönetimlerinde CBS yardımından sıklıkla yararlanan birçok doğal ve insan yapımı kaynaktan sadece birkaçıdır (Bolstad, 2012).

CBS'nin katmanlı yapısı, veri yönetimi ve işletimi için en önemli bileşenlerinden biridir. CBS'deki her bir veri seti, kendine özgü özelliklerine göre ayrı bir katmanda işlenir ve saklanır. Örneğin okullar, hastaneler, otoyollar, su boru hatları, otobüs durakları ve parklar bir şehir haritası üzerinde farklı katmanlarda saklanır. Uygun şehir haritası, yapılan işin türüne veya amaçlanan uygulamaya göre gerekli katmanların üst üste bindirilmesiyle elde edilir. Sonuç olarak, harita üzerinde gereksiz bilgi ve tasvirlerden kaçınılmış olur (Tuna, 2009). Veri katmanlarının işleyişi Şekil 3'de gösterilmiştir.



Şekil 3. CBS Veri Katmanları (Mare Çevre, 2024)

3.1. CBS ile Yer Seçimi

CBS (Coğrafi Bilgi Sistemleri), yer seçimi sürecinde karar vericilere büyük kolaylık sağlayan güçlü bir araçtır. Adımları ise şunlardır:

- **Kriter Belirleme:** Yer seçiminde öncelik verilecek kriterler (ulaşılabilirlik, nüfus yoğunluğu, çevresel etkiler gibi) belirlenir.
- **Ağırlıklandırma:** Her bir kriterin önemi, karar vericinin değerlendirmesine göre ağırlıklandırılır.
- **Veri Toplama:** Yer seçimi için belirlenen kriterlerin verileri toplanır ve CBS ortamına yüklenir.
- **Veri Analizi:** Yüklenen veriler, çeşitli analiz yöntemleriyle (mesafe analizi, yoğunluk analizi, buffer analizi gibi) incelenir ve değerlendirilir.
- **Katman Oluşturma:** Her bir kriter için ayrı bir katman oluşturulur ve bu katmanlar, belirlenen ağırlıklara göre birleştirilir.
- **Haritalama:** Analiz sonuçları, coğrafi bir haritada görselleştirilir. Böylece, en uygun yerler kolayca belirlenebilir.
- **Senaryo Analizi:** Farklı senaryolar oluşturularak, farklı kriterlerin veya farklı ağırlıkların yer seçimi üzerindeki etkileri incelenebilir.

4. LİTERATÜR TARAMASI

CBS ve ÇKKV'yi kullanan birçok çalışma olmasına rağmen, dikey tarım ve ÇKKV'yi birleştiren literatürde bir araştırma bulunmamaktadır. Bu nedenle, literatür taraması dikey tarım yer seçimi çalışmaları ile sınırlı değildir. Türkiye'de son yıllarda ÇKKV ve CBS'nin birlikte kullanıldığı ekim alanları, güneş enerjisi santralleri, rüzgar enerjisi santralleri ve tarımsal arazi uygunluğu gibi çiftlik yer seçimi çalışmaları da incelenmiş ve kapsamlı bir teorik temel ve arka plan sunulmuştur.

Everest ve Gür (2022), Çanakkale ili Bayramiç ilçesi Derekolu bölgesinde şeftali yetiştiriciliği için uygun alanları belirlemek amacıyla analitik hiyerarşi sürecini (AHP) kullanan bir metodoloji geliştirmiştir. Yer seçimi için 12 kriter belirlenmiş ve bu kriterlerin ağırlıkları AHP ile hesaplanmıştır. Uygun arazilerin değerlendirmelerini kolaylaştırmak için GIS tabanlı haritalar oluşturulmuştur. Sonunda ise en uygun yer seçimi yapılmıştır.

Tercan vd. (2022), Türkiye'de fındık üretimiyle bilinen bir bölge olan Ordu ili Ünye ilçesinde fındık yetiştiriciliği için en uygun lokasyonları bulmak için bulanık AHP, ters mesafe ağırlıklandırma, çok kriterli karar analizi, CBS ve ağırlıklı doğrusal kombinasyon içeren bir model oluşturmuştur. 7 ana kriter ve 35 alt kritere dayalı bir arazi uygunluk modeli geliştirmişlerdir. Model, fındık yetiştiriciliği için en uygun yerler olarak kıyı alanlarını belirlemiştir.

Uyan ve Doğmuş (2022), Konya ili Çumra Bölgesi'nde güneş enerjisi santralleri için en iyi yerleri bulmak amacıyla ANP ve GIS'in bir kombinasyonunu kullanmıştır. Güneş enerjisi santralleri için en iyi yer, 6 temel kriter tanımlanarak belirlenmiştir. ANP ile kriter ağırlıkları belirlenmiş, GIS yazılımı kullanılarak kriter haritaları oluşturulmuştur. Eşit mesafeli sınıflandırma yaklaşımı ile donatılan uygunluk haritası, düşük, orta ve yüksek kalite olmak üzere üç gruba ayrılmıştır.

Çıtıroğlu ve Arca (2022), Karabük-Ovacık ilçesinde güneş enerjisi santralleri için uygun yerleri belirlemek amacıyla GIS ve AHP'yi kullanmıştır. AHP, 9 farklı kriterin önemini belirlemek için kullanılmıştır. Çalışma, Ovacık İlçesi'nin düşük, orta ve yüksek hassasiyetli alanlar olmak üzere güneş enerjisi santrali inşası için değişen hassasiyet seviyelerine sahip olduğunu belirlemiştir.

Kilic vd. (2022), Yeşilırmak Havzası'nın üst kısmında yer alan Tozanlı'da ekmeklik buğday (Triticum aestivum) yetiştirmek için arazi uygunluğunu analiz etmeyi ve değerlendirmeyi ve bulanık AHP ile CBS'yi birleştirerek buğday ekimi

için uygun arazinin bir haritasını çıkarmayı amaçlamıştır. Uygunluk sınıflandırmaları oluşturulurken havzanın topografyası ve toprağın birkaç fiziksel ve kimyasal parametresi dikkate alınmıştır. Sonuçlara göre tüm arazinin %54,92'sinin buğday tarımı için kalıcı olarak uygun olmadığı bulunmuştur.

Akdeniz vd. (2023), Türkiye'nin Akdeniz bölgesinde karides yetiştirme tesisi için en iyi yerleri belirlemek amacıyla AHP ve CBS tabanlı bir sistem oluşturmuşlardır. Arazi, su mevcudiyeti, altyapı ve tesisin yerleşimini etkileyen sosyoekonomik olmak üzere üç temel kategoriye giren on bir alt kriter belirlenmiştir. Analiz sonucunda çalışma alanının %0,01'inin oldukça uygun, %0,87'sinin uygun, %4,69'unun orta derecede kabul edilebilir ve %94,43'ünün uygun olmadığı bulunmuştur.

Kocabaldır ve Yücel (2023), maliyet etkin ve verimli fotovoltaik (PV) GES'lerin uygulanması için kapsamlı bir saha seçimi analizi için AHP ve CBS tabanlı bir sistem oluşturmuştur. Kriterleri ağırlıklandırmak için AHP kullanılmıştır. GIS kullanılarak uygunluk haritaları oluşturulmuştur. Bulgular, araştırma alanının %96'sının kapsandığını, %3'ünün son derece uygun olduğunu ve %3'ünün en kabul edilebilir olduğunu göstermiştir.

Demir vd. (2023), AHP CBS'nin bir kombinasyonunu kullanarak Türkiye, İzmir'deki büyük ölçekli PV santrallerinin saha seçimi için yeni bir yaklaşım önermiştir. Kriter ağırlıklıları AHP yöntemi ile belirlenmiştir. Arazi maliyeti kriteri bu çalışmalara ilk defa eklenmiş bir kriterdir. Ayrıca, GIS simülasyonlarından türetilen uygun alanları daha kapsamlı bir şekilde incelemek ve PV çiftlikleri için en iyi yerleri belirlemek amacıyla yepyeni bir teknik ortaya çıkarılmıştır.

Topuz ve Deniz (2023), Manisa ili Demirci ilçesi için AHP ve Ağırlıklı Kaplama yöntemlerini kullanarak bir arazi kullanım uygunluk haritası geliştirmiştir. Haritalama için CBS teknolojisinden yararlanılmıştır. Uzmanların rehberliğinde 11 kriter belirlenmiştir. Daha sonra, GIS yazılımı kullanılarak katman haritaları oluşturulmuştur. Alanın üç farklı kullanım için uygun olduğu keşfedildi: tarım, çayır-mera ve orman. Bulgular, uygun arazi kullanımı ile mevcut arazi kullanımı arasında en büyük tutarsızlığın tarım alanlarına ait olduğunu göstermiştir.

Uyan vd. (2023), Ankara bölgesinde (Türkiye) üzüm (Vitis vinifera L.) tarımı için arazi uygunluğunu belirlemek üzere bir metodoloji önermiştir. Nitelikli tarım mühendislerinin ve bölgesel ürün yetiştiricilerinin bakış açıları dikkate alınarak optimum yerleri belirlemek için 11 faktör değerlendirilmiştir. Seçilen değerlendirme kriterleri için ağırlıklar en iyi-en kötü yöntemi (BWM) kullanılarak hesap-

landı. Ortaya çıkan harita kullanılarak üzüm yetiştiriciliği için ideal yerlerin mekansal dağılımı incelendiğinde, araştırma alanının güney bölgelerinin daha uygun olduğu görülmektedir.

Konurhan ve ark. (2023), BWM ve CBS kullanarak, Türkiye'nin doğusundaki Tunceli ili için bir güneş enerjisi santrali için ideal yeri belirlemiştir. Dört temel kriterin altındaki 16 alt kriter, BWM modeli kullanılarak ağırlıklandırılmıştır. Daha sonra, bu parametrelere dayanarak haritalar yapılmış ve her haritanın açıklamasına alt kriterlerin her biri için 6 puanlık bir derecelendirme verilmiştir. Sonuç olarak, en ideal noktaları belirlemek için GIS tabanlı hesaplamalar kullanıldıktan sonra en uygun bölgeler belirlenmiştir.

Yıldız (2024), Türkiye, Balıkesir'de rüzgar santrali kurulumu için potansiyel olan alanları belirlemek için GIS tabanlı bir Mekansal Çok Kriterli Karar Verme (SMCDM) yaklaşımı sunmuştur. Çalışmada, liman kriteri adı verilen yeni bir kriter eklenmiştir. AHP kullanılarak uygunluk haritaları ve ağırlıklı kriterler oluşturulmuştur. Çalışmanın bulgularına göre, değerlendirilen tüm alanın %2,34'ü en uygun sınıfa, %9,34'ü ise bir sonraki en uygun sınıfa ait olduğu belirlenmiştir.

Mahdy ve Hashem'in (2023) çalışmasında, dikey tarım alanı seçimi sorununu ele alan tek makaledir. Yazarlar, Bahreyn'in kontrollü iç mekan ortamında yerel olarak yetiştirilen meyve ve sebzelerin miktarını ve kalitesini artırmayı amaçlayan ve böylece yerel topluluğa ve Bahreyn vatandaşlarına fayda sağlayan bir kentsel dikey çiftlik projesinin ihtiyaçları incelenmiştir. Bir dizi kriter için bir karar destek çerçevesi tanıtılmış ve uygun yer seçilmiştir. En uygun yere SWOT analizi uygulanmış ve seçilen yerin güçlü, zayıf yönleri, fırsatları ve tehditleri belirlenmiştir.

5. DİKEY TARIM YER SEÇİMİ KRİTERLERİ

Dikey tarım için bir yer seçerken, projenin uygulanabilirliğini ve başarısını belirledikleri için kriterler çok önemlidir. Kriterler, sahanın dikey tarım işini yürütmek için gerekli olan ulaşım, enerji ve su gibi altyapı ve kaynaklara sahip olduğunu garanti eder. Aşağıda dikey tarım yer seçimi için belirtilen kriterlere yer verilmiştir.

- **Açıklık ve Doğal Güneş Işığına Maruz Kalma:** Güneş panelleri kullanarak kendi elektriğini üreteceği için seçilen yer, maksimum ve doğrudan güneş ışığına maruz kalması için açık alanlarla çevrili olmalıdır.

- **Kirlilik Kaynaklarından Uzak:** Dikey tarımda yetiştirilen ürünlerin sağlık ve kalitesini sağlamak için seçilen alan, kirlilik kaynaklarından uzak olmalıdır.
- **Dağıtım Piyasalarına Yakın**: Yer, süpermarketler ve perakende merkezleri gibi dağıtım piyasalarına yakın olması tercih edilir. Böylece, ulaşım mesafelerinin, ulaşım kaynaklı kirliliğin ve ulaşım maliyetlerinin azaltılması hedeflenir.
- **Otoyol ve Yollardan Uzaklık:** Araçların konuma kolay erişimi olması gerekir. Bu nedenle, otoyol ve yollara yakın olmalıdır.
- **Bina Alanı:** Planlanan çiftliğin geniş bir alanda inşa edilmesi planlanmaktadır. En az 15.000 metrekare arazi gereklidir.
- **Suya Kolay Erişim:** Dikey tarımın verimliliğini ve sürdürülebilirliğini sağlamak için suya erişim kritiktir. Bu nedenle, alan mümkün olduğunca suya yakın olmalıdır.
- **Ulaşım Ve Toplu Taşıma:** Araçların ve yayaların alana kolay erişimi olmalı ve ana toplu taşıma ağlarına yakın olmalıdır. Böylece, hem çalışanlar işlerine kolayca ulaşabilir hem de ürünler tüketicilere daha kolay teslim edilebilir.
- **Arazi Örtüsü:** Binanın inşa edileceği arazinin boş ve kullanılmamış olması gerekir. Bu nedenle, arazi özellikleri dikkate alınmalıdır.

6. SONUÇ

Dünya çapında popülerlik kazanan en önemli tarım uygulamalarından biri dikey tarımdır. Dikey çiftlikler kendi sistemlerine sahip oldukları için hava, su veya toprak kirliliğinden etkilenmezler. İnsanlar nem ve sıcaklık gibi değişkenler üzerinde kontrol sahibidir. Bu tarım, adından da anlaşılacağı gibi bitkilerin üst üste yerleştirilmesi şeklinde yapılır. Bu şekilde alan korunmuş olur. Kirlilik ve aşırı kalabalıktan etkilenen uluslar için bu özellik hayat kurtarıcı bir hale gelmiştir. Alandan en iyi şekilde yararlanmak için doğru dikey tarım konumunu seçmek çok önemlidir. İlgili sorunları ele almak üzere en uygun yeri belirlemek için yetkililer ve karar vericiler harekete geçmelidir. Bu çalışmanın amacı, dikey tarım için ideal konumları belirlemektir. Bu çalışma ile dikey tarımın çağdaş sürdürülebilir bir tarımsal çözüm olarak önemi vurgulanmaktadır. Dikey tarım için en iyi yerlerin belirlenmesinin mümkün olduğu ve CBS teknolojisinin süreç için gerekli olduğu gösterilmiştir. Dikey tarım projeleri, özellikle günümüzün hızlı değişen tarım dinamikleri içerisinde, çeşitli kriterler ve Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS)

entegrasyonu ile yönlendirilmektedir. CBS'nin bu alandaki kullanımı, dikey tarım uygulamalarının yaygınlaşmasıyla giderek daha kritik bir rol oynamaktadır. CBS, tarımsal alanların daha etkin bir şekilde yönetilmesini sağlarken, lokasyon, iklim koşulları, sulama ihtiyaçları ve pazar talepleri gibi birçok önemli veriyi analiz etme imkanı sunar. Bu sayede, dikey tarım sistemlerinin optimize edilmesi ve daha etkili kararlar alınması mümkün hale gelir. Teknolojideki ilerlemeler, dikey tarımın daha umut verici bir geleceğe sahip olmasını sağlamakta ve bu yöntemlerin yaygınlaşmasını hızlandırmaktadır. Gelişmiş sensör teknolojileri, otomasyon sistemleri ve veri analitiği, dikey tarım süreçlerinin daha verimli ve sürdürülebilir hale gelmesine katkıda bulunmaktadır. CBS teknolojisinin dikey tarım tekniklerine daha fazla entegre edilmesi, bitki yetiştirme koşullarının sürekli izlenmesi ve optimize edilmesi açısından büyük faydalar sunar. Bu entegrasyon, kaynak kullanımını en üst düzeye çıkararak, su ve enerji tasarrufu sağlamanın yanı sıra, ürün kalitesinin artırılmasına da olanak tanır. Bu çalışmanın bulguları, dikey tarım alanında daha fazla araştırma yapılmasını teşvik ederken, aynı zamanda daha iyi proje yürütme yöntemlerinin geliştirilmesine de destek olacaktır. Dikey tarımın potansiyelinin daha iyi anlaşılması ve uygulanması, gıda güvenliği, çevresel sürdürülebilirlik ve ekonomik verimlilik açısından önemli bir katkı sağlayacaktır. Sonuç olarak, dikey tarım projelerinin başarılı bir şekilde uygulanabilmesi için CBS'nin etkin kullanımı ve sürekli gelişimi, bu alanda yenilikçi çözümler üretmek ve geleceğin tarım sistemlerini şekillendirmek adına büyük bir fırsat sunmaktadır. Devletler, yerel yönetimler ve kurumsal sektör, dikey tarımı geliştirmek için birlikte çalışmalıdır. Bu da dikey tarım girişimleri için teşvik ve destek sistemlerinin kurulmasını, CBS teknolojilerine erişimin kolaylaştırılmasını ve yerel kamu bilgisinin artırılmasını gerektirmektedir. Dikey tarım için bir yer seçerken, CBS ile ÇKKV yaklaşımlarını birleştirmenin çok sayıda önemli avantajı vardır. CBS, arazi kullanımı, iklim ve kaynak yakınlığı gibi çok sayıda coğrafi yönün mekansal çalışmasını sağlayarak olası yerleri değerlendirmek için görsel ve veri odaklı bir çerçeve sunar. CBS'yi tamamlayan bulanık SWARA ve AHP gibi ÇKKV teknikleri, genellikle çelişkili olan birkaç kriterin sistematik olarak değerlendirilmesine olanak tanır; bu sayede yer seçimi gibi karmaşık karar verme süreçleri için daha doğru sonuçlar elde edilir. Mekânsal verileri çok kriterli değerlendirmeyle birleştirerek ve hem coğrafi hem de sosyoekonomik unsurların hesaba katıldığından emin olarak daha doğru analizler için çalışılır. Ek olarak, karar vericilerin çeşitli kriterler arasındaki dengeleri görmelerine ve sağlam, veri destekli araştırmalarla kararları desteklemelerine olanak tanıyarak, bu kombinasyon nesnelliği ve şeffaflığı artırır. Bu entegre strateji, güneş ışığı, suya erişim ve kent-

sel yakınlık gibi unsurların kritik olduğu dikey tarım için en uygun alanların belirlenmesine yardımcı olur ve böylece kaynak kullanımını ve tarımsal çıktıyı optimize eder.

TEŞEKKÜR

Bu araştırma İzmir Bakırçay Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü BBAP.2024.003 No'lu proje ile desteklenmiştir.

KAYNAKÇA

Akdeniz, H. B., Yalpır, Ş., & İnam, Ş. (2023). Assessment of suitable shrimp farming site selection using geographical information system based Analytical Hierarchy Process in Turkey. Ocean & Coastal Management, 235, 106468. https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2022.106468

Bayraç, H. N., & Doğan, E. (2016). Türkiye'de iklim değişikliğinin tarım sektörü üzerine etkileri. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi İİBF Dergisi, 11(1), 23-48.

Birpınar, M.E. (2022). "Küresel Sorun İklim Değişikliği: "Gelişimi, Uluslararası Müzakereler ve Türkiye"", Çevre, Şehir ve İklim Dergisi. Yıl: 1. Sayı: 1. ss. 20-36.

Bolstad, P. (2012). GIS fundamentals (Vol. 4). White Bear Lake, MN: Eider Press.

Cankül, I., & Toprak, Y. (2022). Sürdürülebilir Gastronomi Bağlamında Dikey Tarım Uygulamaları (Vertıcal Agrıculture Practıces In The Context Of Sustaınable Gastronomy). Journal Of Gastronomy, Hospıtalıty And Travel, 7(2), 1760-1767.

Citiroglu, H. K., & Arca, D. (2022). GIS-based determınatıon of solar power plant (SPP) sıtes by the MCDA method: Ovacık district, Karabük-Türkiye. Environmental Engineering & Management Journal (EEMJ), 21(11).

Demir, A., Dinçer, A. E., & Yılmaz, K. (2023). A novel method for the site selection of large-scale PV farms by using AHP and GIS: A case study in İzmir, Türkiye. Solar Energy, 259, 235–245. https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.05.031

Doğan, S., & Tüzer, M. (2011). Küresel iklim değişikliği ve potansiyel etkileri. CÜ İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi, 12(1), 21-34.

EC-DGE (European Commission-Directorate General Environment) (2005), "The Impacts and Costs of Climate Change", http://ec.europa.eu/environment/ climat/pdf/final_report2.pdf, 12.07.2009.

Ersöz, F., & Kabak, M. (2010). Savunma sanayi uygulamalarinda çok kriterli karar verme yöntemlerinin literatür araştirmasi. Savunma Bilimleri Dergisi, 9(1), 97-125.

Everest, T., & Gür, E. (2022). A GIS-based land evaluation model for peach cultivation by using AHP: a case study in NW Turkey. Environmental Monitoring and Assessment, 194(4). https://doi.org/10.1007/s10661-022-09898-6

IPCC (1997), "IPCC Special Report The Regional Impacts of Climate Change: An Assessment of Vulnerability", http://www.grida.no/climate/ipcc/spmpdf/region-e.pdf, 24.04.2009.

Kılıc, O. M., Ersayın, K., Gunal, H., Khalofah, A., & Alsubeie, M. S. (2022). Combination of fuzzy-AHP and GIS techniques in land suitability assessment for

wheat (Triticum aestivum) cultivation. Saudi Journal of Biological Sciences, 29(4), 2634-2644.

Kocabaldır, C., & Yücel, M. A. (2023). GIS-based multicriteria decision analysis for spatial planning of solar photovoltaic power plants in Çanakkale province, Turkey. Renewable Energy, 212, 455–467. https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.05.075

Konurhan, Z., Yücesan, M., & Gül, M. (2023). A GIS-Based BWM approach for the location selection of solar power plant in Tunceli Province (Turkey). In Lecture notes in operations research (pp. 87–102). https://doi.org/10.1007/978-3-031-24816-0_8

Mahdy, M. A., & Hashem, F. (2023). A decision support discussion to select location for vertical farm in Bahrain. Journal of Sustainable Cities and Built Environment, 1(01), 52-82.

Mare Çevre. (2024.). Coğrafi bilgi sistemi. Mare Çevre. https://marecevre.com.tr/cografi-bilgi-sistemi/

Özacar, İ. U. (2022, December 6). İklim değişikliğiyle yazlar uzuyor kışlar kısalıyor. TRT Haber. Retrieved from https://www.trthaber.com

Tercan, E., Dengız, O., Özkan, B., Dereli, M. A., & Öztekin, Y. B. (2022). Geographic information system–assisted site quality assessment for hazelnut cultivation using multi-criteria decision analysis in the Black Sea region, Turkey. Environmental Science and Pollution Research International, 29(24), 35908–35933. https://doi.org/10.1007/s11356-021-18127-5

Texier, W. (2016). Hydroponics for everybody. Mama Editions, Paris (France), 7.

Topuz, M., & Deniz, M. (2023). Application of GIS and AHP for land use suitability analysis: case of Demirci district (Turkey). Humanities & Social Sciences Communications, 10(1). https://doi.org/10.1057/s41599-023-01609-x

Tuna, F. (2009). Ortaöğretim coğrafya derslerinde proje tabanlı öğrenimi desteklemek amacı ile coğrafi bilgi sistemlerinden (CBS) yararlanma (Order No. 28582802). Available from ProQuest Dissertations & Theses Global. (2568024683). Retrieved from https://www.proquest.com/dissertations-theses/ortaöğretim-coğrafya-derslerinde-proje-tabanlı/docview/2568024683/se-2

Uyan, M., & Dogmus, O. L. (2022). An Integrated GIS-Based ANP analysis for selecting solar farm installation locations: case study in Cumra region, Turkey. Environmental Modeling & Assessment, 28(1), 105–119. https://doi.org/10.1007/s10666-022-09870-1

Uyan, M., Janus, J., & Ertunç, E. (2023). Land Use Suitability Model for Grapevine (Vitis vinifera L.) Cultivation Using the Best Worst Method: A Case Study from Ankara/Türkiye. Agriculture, 13(9), 1722. https://doi.org/10.3390/agriculture13091722

Woldemichael, G., Endashaw, A., Tadesse, A., & Achamo, B. (2020). Assessment of farmers perception to soil fertility management in Kalisha District, Hadiya zone, southern Ethiopia. American Journal of Theoretical and Applied Statistics, 9(3), 47. https://doi.org/10.11648/j.ajtas.20200903.13

Yıldız, S. S. (2024). Spatial multi-criteria decision making approach for wind farm site selection: A case study in Balıkesir, Turkey. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 192, 114158. https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.114158



Ağır Metal Gideriminde Yapay Zekanın Kullanılabilirliğinin Araştırılması

Ayşegül Yücel[1]

[1] Dr. Öğr. Üyesi, İskenderun Teknik Üniversitesi, İskenderun Meslek Yüksekokulu, ORCID: 0000-0001-7069-7518

1. GİRİŞ

Doğal yaşam içerisinde avcı toplum iken zaman içerisinde ihtiyaçların oluşması, bu ihtiyaçlara çözüm üretmek üzere endüstri hızla gelişti. Büyüyen endüstri beraberinde teknolojiyi ve ekonominin de gelişmesini sağladı. Bu gelişimi bilgisayar ile hızlandıran Endüstri 3.0'dan güvenlik ve maliyetin ön planda tutulduğu insansız teknolojilerin geliştirildiği Endüstri 4.0 dönemine oldukça hızlı bir geçiş sağlanmıştır. Büyük verilerin oluşması, bulut sistemler ve yapay zekanın kullanımı ve yaygınlaşması Endüstri 5.0 döneminin başladığını göstermektedir. Böylelikle verinin saklanması, kullanılması ve karar verme aşamasında yapay zekanın devreye girmesi endüstriyel proseslerde ortaya çıkabilecek sorunlara çözüm bulunmasında ya da önlenmesinde oldukça etkili olacağı ön görülmektedir.

Teknolojinin bu kadar hızlı gelişimi ihtiyaçların sağlanmasında ve üretimde avantaj sağlarken diğer yandan olumsuz çevresel bir etki de yaratmaktadır. Bu etkilerden biri düşük konsantrasyonda olmalarına rağmen toksik etkiye sahip olan ağır metallerdir [1]. Ağır metaller başta su, hava ve toprak kaynaklarından canlı metabolizmalara taşınarak toksik etki gösterir [2-5]. Ağır metaller farklı maden yataklarında çeşitli mineraller ile birlikte bulunduğu gibi başta tarım endüstrisi olmak üzere atık su artıma tesisleri, cam, demir çelik ve çimento üretim tesislerinin atıklarında da bulunmaktadır.

Özellikle atıksu arıtımında, kurşun (Pb), kadmiyum (Cd), krom (Cr), nikel (Ni), ve arsenik (As) gibi toksik elementlerin giderimi, yüksek etkinlik gerektiren süreçler gerektirir. Sabit yataklı kolon adsorpsiyonu, yüksek verimlilik ve kolay operasyonel kontrol özellikleriyle ağır metal gideriminde sıkça tercih edilen bir yöntemdir. Ancak, bu yöntemin optimum performansa ulaşması için sistem parametrelerinin dikkatlice belirlenmesi önemlidir. Yapay zekanın sisteme dahil edilmesi süreç tasarımı ve sürecin yönetimin optimum parametreler ile zaman ve maliyet açısından oldukça avantaj sağlayacağı ön görülmektedir.

2. SABİT YATAKLI KOLONLAR İLE AĞIR METAL GİDERİMİ

Çevresel kirliliklerin başında gelen ağır metallerin gideriminde en yaygın kullanılan yöntemler kesikli adsorpsiyon ve sabit yataklı kolon adsorpsiyonu olarak sıralanabilir. Kesikli adsorpsiyon genellikle küçük hacimli genellikle laboratuvar ölçeğinde kullanılmaktadır. Adsorpsiyon parametrelerinin (pH, adsorban miktarı, ağır metal başlangıç konsantrasyonu, sıcaklık vb.) kontrol kolaylığını sağlamaktadır. Ayrıca karmaşık sistemler gerektirmeyen, düşük maliyetli ve yeterli süre sağlandığında yüksek verim alabilecek bir yöntemdir. Ancak sürekli bir iş akış sistemine uygun değildir. Her işlemden sonra adsorban olarak kullanılan madde-

nin çözeltiden ayrılması sistemin yeniden kurulması gibi iş gücü zorlukları mevcuttur [6]. Endüstriyel uygulamalarda ise ölçeklendirme sorunlarının olması olasıdır.

Endüstriyel uygulamalarda daha yaygın kullanılan, sürekli akışı mümkün kılan sabit yataklı kolon adsorpsiyonunda ise büyük hacimli çözeltiler kullanılabilir [7]. Kullanılan matematiksel modellemeler ile pilot ve endüstriyel ölçeklendirme yapılabilir. Sistem sürekliliği mevcut olduğundan kullanıcı müdahalesi daha az olacaktır. Endüstriyel uygulamalarda başlangıç maliyeti yüksek olması, kesikli adsorpsiyona göre modellemede kırılma noktası, kütle transferi gibi parametrelerin modellenmesi oldukça zordur. Kesikli ve sabit yataklı kolon adsorpsiyonun süreklilik, kontrol kolaylığı, ölçeklendirme, ekipman gereksinimi, endüstriyel kullanımı ve uygulama alanı özelliklerine göre karşılaştırması Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Adsorpsiyon yöntemlerinin özelliklerine göre karşılaştırılması

Özellik	**Kesikli Adsorpsiyon**	**Sabit Yataklı Kolon Adsorpsiyonu**
Süreklilik	Yok	Var
Kontrol Kolaylığı	Yüksek	Orta
Ölçeklendirme	Zor	Kolay
Ekipman Gereksinimi	Düşük	Yüksek
Endüstriyel Kullanım	Sınırlı	Yaygın
Uygulama Alanı	Laboratuvar ve küçük ölçek	Büyük ölçek ve sürekli prosesler

Ağır metallerin adsorpsiyonunda yüzeylerinde karboksi ve hidroksil gibi çeşitli fonksiyonel gruplara, yapılarında bulunan yüzey alanı ve gözenek hacmine göre bazı tarımsal ya da endüstriyel atıklar kullanılmaktadır [8]. Pb(II), Cu(II), Cd(II) ve Cr(VI) gibi metallerin adsorpsiyonunda genellikle zeytin çekirdeği, çam kozalağı gibi bol ve ucuz temin edilebilecek tarımsal atıkların kullanıldığı görülmüştür [9-10]. Ancak bu çalışmalar kesikli adsorpsiyon yöntemi ile yapılmış, abdsorban-adsorbat sisteminin dengeye gelmesiyle maksimum adsorpsiyon kapasitesi belirlenebilmiştir. Bunun olabilmesi de ancak yeterli temas süresinin sağlanması ile mümkündür [11-12].

Kesikli adsorpsiyonda kullanılan doğal malzemelerin (zeolit, pomza vb.) sulu çözeltilerden ayrılmasındaki zorluklar [13] ve sabit yataklı kolonlarda ise basınç

düzensizliklerinin olması polimer ya da inorganik bazlı kompozitlerin [14-15] geliştirilmesine neden olmuştur.

Lakshmipathy ve diğ., (2021), sulu çözeltilerden Pb(II) iyonlarının uzaklaştırılması amacıyla sabit yataklı bir kolon sisteminde ZSM-5/AC kompozitini kullandılar. Sabit yataklı kolon sisteminde düşük akış hızı, artan yatak yüksekliği ve daha düşük başlangıç giriş konsantrasyonu gibi parametreleri optimize ederek Pb (II) iyonları için kompozitin 213,3 mg g^{-1} olarak maksimum adsorpsiyon kapasitesini tespit etmişlerdir [16].

Ganji ve diğ., (2024) yaptıkları çalışmada nehir suyundan ağır metal giderimini sağlamak amacıyla kum-kolon filtrasyon sistemlerinde fıstık kabuğu atığı tozu kullanmışlardır. Bu adsorbanın adsorpsiyon kapasitesinin belirlenmesi amacıyla Pb, Cu, Co ve Ni içeren sentetik su ve daha sonra kirli nehir suyu ile çalışılmıştır. Kullanılan adsorban malzemesinin yüksek yüzey alanına sahip olması, 60 dakika temas süresinde ise sırasıyla %87, %73, %69 ve %88'e kadar Pb, Cu, Co ve Ni'yi giderebildiği tespit edilmiştir. Ayrıca sabit yataklı kolon çalışmalarında ise Thomas ve Yoon-Nelson modelleri deneysel verilerle en iyi eşleşmeyi gösterdiğini ve kırılma eğrileri incelendiğinde adsorban malzemesinin tükenme süresinin 400 dakikadan 800 dakikaya çıkabileceğini bildirmişlerdir [17].

Ahmad ve diğ., (2023), jujube biyokütlesinden üretilen biyokömürleri sabit yataklı kolonda Pb (II) ve Cd (II) gideriminde kullanmışlardır. Kum filtrelerine kıyasla sırasıyla en yüksek %50 atılım süresini Pb(II) ve Cd(II) giderimi için 38,07 ve 60,49 dakika gösterdiğini bildirmişlerdir. Ayrıca Pb(II) ve Cd(II) giderimi için sırasıyla 557,65 ve 210,59 mg g^{-1} maksimum adsorpsiyon kapasitesine ulaşabileceklerini tespit etmişlerdir [18].

Park ve diğ., (2024) grafen oksit (GO) ile kaplanmış bir poli-laktik asit (PLA) filtresi 3 boyutlu baskı tekniği ile hazırlamışlardır. GO/PLA filtresinin Langmuir modeline göre Cd için maksimum adsorpsiyon kapasitesi 1,26 mg g^{-1} hesaplamışlardır. GO/PLA filtresini içeren kolon, doygunluk noktasına ($C_0 = C_t$) kadar 1250 saate kadar çalıştırılabilirken, saf PLA filtresini içeren kolon yalnızca 15 saat kullanılabildiğini tespit etmişlerdir [19].

Islam ve diğ., (2023) yaptıkları çalışmada karboksimetillenmiş kraft hamurunu sabit yataklı kolon adsorpsiyonunda adsorban malzeme olarak Pb (II), Zn (II), Cu (II) ve As (III) metallerin gideriminde kullanılmıştır. Bu çalışmada besleme pH'ı 5,5, besleme akış hızı 15 mL dak^{-1} ve tek bileşenli sistem için besleme konsantrasyonları 10 mg L^{-1} ve çok bileşenli sistem için ise her bir metal iyonu için 2,5 mg L^{-1} çalışmışlardır. Adsorbanın metal iyon tutma kapasiteleri tek bileşenli sistemde Pb (II) için 101,0 mg g-1, Zn (II) için 33,7 mg g^{-1}, Cu (II) için 31,7

mg g^{-1} ve As (II) için 20,0 mg g^{-1} olarak, çok bileşenli sistemde ise Pb (II) için 20,3 mg g^{-1}, Zn (II) için 8,4 mg g^{-1}, Cu (II) için 7,8 mg g^{-1} ve As (III) için 4,5 mg g^{-1} olarak belirlenmiştir [20].

Ağır metallerin gideriminde kullanılan sabit yataklı kolonlarda adsorban malzemesi türlerinin adsorplama kapasitesi ve adsorbanın yüksek ve seçici özelliği ön plana çıksa da çalışmalar esnasında yaşanabilecek bazı zorluklarda mevcuttur. Akış hızı, adsorban miktarı, adsorban yüksekliği, kolon yüksekliği, kolon genişliği gibi parametrelerin optimizasyonu zorlu ve uzun zaman isteyen bir süreçtir. Ayrıca gerçek zamanlı olası koşulların değişimi olarak tanımlanabilecek dinamik koşulların yönetimi de zaman alıcı ve maliyeti yüksek olabilir.

3. SABİT YATAKLI KOLON ADSORPSİYONUNDA YAPAY ZEKA KULLANIMI

Sabit yataklı kolon adsorpsiyonunda parametrelerin karmaşıklığı, optimizasyonu ve dinamik koşulların yönetiminde yaşanan zorlukların yapay zeka ile süreç iyileştirilmesi güçlü bir yapı olarak ön görülmektedir. Yapay zeka veri analizi, optimizasyon, tahmin ve sistem kontrolü yaparak süreci iyileştirebilir.

Yapay sinir ağı (YSA), bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki doğrusal olmayan ilişkiyi tahmin etmek için kullanılır ve kirleticilerin adsorpsiyonu ve bozunması gibi çevre yönetimi alanında kullanıldığı çalışmalar mevcuttur [21-22].

Yapay zeka tabanlı yöntemler arasında yapay sinir ağı (YSA) [23-24], bulanık mantık [25-26] ve destek vektör makinesi (SVM) [27-29] yer alır. Destek vektör makinesinin (SVM) yapısal riski en aza indirme ilkesi durgunluk sorununu çözerek genellemeyi iyileştirebilir. Ancak tahmin doğrulu seçilen parametre arasındaki bağımlılığı bu yöntem için dezavantaj oluşturmaktadır [30].

Yapay sinir ağı (YSA), tahmin sorunları için en yaygın kabul gören yöntemdir. YSA, doğrusal olmayan girdi değişkenleri için geleneksel tahmin modellerine kıyasla en az tahmin hatası sağlar [31]. Girdi ve çıktı değişkenleri arasındaki ilişkiyi, girdiler arasında karmaşık bağımlılık oluşturmadan haritalama yeteneği, YSA'nın istatistiksel modellere göre bir diğer avantajıdır. Sinir ağı, karmaşık ilişkileri kolayca öğrenebilir ve belirsiz koşullar altında güçlü karar alma yeteneğine sahiptir [32].

Mitra ve diğ., (2014) Sabit yataklı cam kolonda adsorpsiyon verileri üretmek için sümbül kökü biyosorbent olarak kullanmışlardır. Besleme Pb(II) iyon konsantrasyonu, sıvı akış hızı ve yatak yüksekliği gibi farklı çalışma parametrelerinin kırılma eğrileri ve kolonun performansı üzerindeki etkisi incelemişlerdir. Sonuçlar, adsorpsiyon verimliliğinin yatak yüksekliğindeki artışla arttığını ve besleme

Pb(II) iyon konsantrasyonu ve akış hızındaki artışla azaldığını gösterdiğini, maksimum adsorpsiyon kapasitesinin akış hızındaki ve başlangıç Pb(II) iyon konsantrasyonundaki artışla arttığı, ancak yatak yüksekliğindeki artışla azaldığı tespit etmişlerdir. Yapay sinir ağı (YSA) modellemesinin Pb(II) iyon gideriminin tahmini için uygulanabilirliği, geri yayılımlı çok katmanlı algılayıcı, Levenberg-Marquardt ve ölçekli eşlenik algoritmaları ve gizli bir katmanda dört farklı transfer fonksiyonu ve doğrusal bir çıkış transfer fonksiyonu kullanılarak bildirmişlerdir [33].

Nag ve diğ., (2019) jak meyvesi, mango ve kauçuk yapraklarından oluşan üç farklı atığı sürekliakış olan kolon sisteminde kullanmışlardır. Cd (II) giderimini besleme konsantrasyonu, yatak derinliği ve akış hızı parametreleri arasında incelemişleridir. Yatak yüksekliğindeki artış adsorpsiyon sürecini iyileştirmiş ancak yüksek akış hızı ve besleme konsantrasyonundaki artış adsorban verimliliğinde düşüşe neden olduğunu bildirmişlerdir. Hibrit yapay zeka genetik algoritma-yapay sinir ağının (GA-ANN) uygulanabilirliği, giriş değişkenlerinin bir fonksiyonu olarak Cd(II) uzaklaştırma verimliliği tahmininin simülasyonu ve optimizasyonu için bir araç olarak denemişlerdir. Ağ, çapraz korelasyon katsayısı (R) değeri (0,997 ila 0,999 arasında) ve hataların en aza indirilmesi açısından oldukça iyi performans gösterdiğini bildirmişlerdir [34].

Batool ve diğ., (2024) Cd(II) ve Pb(II) iyonlarının her iki boya (Reaktif Red198 ve Blue29) ile birlikte bir arada bulunan ortamdaki adsorpsiyon davranışını, Rosa damascena atık biyosorbenti (RDWB) ile tamamen doldurulmuş sürekli sabit yataklı bir kolon kullanılarak incelemişlerdir. Ayrıca, çeşitli girdiler için RDWB'nin performansını tahmin etmek için yapay sinir ağı (YSA) modeli kullanmışlardır. Kolon performansları, yatak derinliği, gelen akış hızı ve biyosorbentlerin konsantrasyonu gibi parametreleri optimize ederek değerlendirildi. Artan yatak derinliğinin operasyonel ömrü önemli ölçüde uzattığı ve akış hızındaki azalmanın kolon adsorpsiyonunu geciktirdiği tespit etmişlerdir. Adsorpsiyon kapasiteleri Pb(II), Cd(II), Red198 ve Blue29 için sırasıyla 24,9, 24,6, 24,0 ve 24,3 mg g-1olduğunu bildirmişlerdir. YSA modelinin eğitimi ve çapraz doğrulaması Levenberg-Marquardt algoritması kullanılarak gerçekleştirmişlerdir. Modelin 10 gizli katman tarafından eğitildiğini, verilerin yaklaşık %70'i eğitim için rastgele seçildiği ve %15'i doğrulama için kullanılırken kalan %15'i test verileri için kullanıldığını belirtmişlerdir. Ayrıca korelasyonlu simülasyon, doğrulama ve test verilerinin R^2 (>0,99) ve düşük ortalama kare hata (MSE) değerleri, yapay sinir ağının, deneysel verileri tahmin etmedeki doğruluğunu belirtmişlerdir [35].

Sabit yataklı kolon adsorpsiyonunda yapay zeka, süreç verimliliğini artırmada önemli bir araç olarak öne çıkmaktadır. Giriş ve çıkış parametrelerinin (pH, akış

hızı, sıcaklık gibi) sürekli izlenmesi, makine öğrenimi algoritmaları ile modellenerek performans tahminleri yapılabilir. Özellikle yapay sinir ağları ve regresyon modelleri, adsorpsiyon kapasitelerinin tahmini ve sistem optimizasyonu için etkili araçlar sunar. Ayrıca, büyük veri analitiği ile adsorpsiyon mekanizmaları anlamlandırılabilir ve en uygun çalışma koşulları belirlenebilir.

4 YAPAY ZEKANIN SABİT YATAKLI KOLON TEKNOLOJİSİNDEKİ GELECEKTEKİ ROLÜ

Yapay zekanın sabit yataklı kolon teknolojisinde gelecekteki rolü, süreç kontrolü ve optimizasyonunun ötesine geçerek sistemlerin öngörülebilirlik ve adaptasyon kabiliyetlerini dönüştürmeyi vaat etmektedir. Makine öğrenimi ve derin öğrenme algoritmalarının gelişimi, farklı ağır metal türlerinin adsorpsiyon dinamiklerini hassas bir şekilde tahmin etmeyi ve bu bilgiyi gerçek zamanlı süreç kontrolüne entegre etmeyi mümkün kılar. Örneğin, bir yapay sinir ağı modeli, çeşitli metallerin konsantrasyon seviyelerini tespit ederek hangi adsorbanın en verimli olacağını öneren bir karar destek sistemi oluşturabilir. Gelecekte bu sistemlerin hem laboratuvar ortamında hem de endüstriyel ölçekte uygulanabilirliği artırılarak karbon ayak izini azaltma potansiyeline sahip olması beklenmektedir. Bu tür bir yaklaşım hem sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmayı hem de ekonomik faydalar sağlamayı mümkün kılar.

Gelecekte, nesnelerin interneti (IoT) ve dijital ikizler gibi gelişmekte olan teknolojiler, sabit yataklı kolon adsorpsiyonu ile entegre edilerek süreçlerin dijitalleşmesine katkı sağlayabilir. IoT cihazları sayesinde, kolonlarda sürekli olarak veri toplanabilir ve bu veriler, dijital ikiz teknolojisiyle simüle edilerek süreçlerin optimize edilmesi sağlanabilir. Dijital ikizler, sanal bir kolon modeli yaratarak farklı çalışma senaryolarını risksiz bir şekilde test etme imkanı sunar. Örneğin, bir kolonun doygunluk seviyesini ve rejenerasyon zamanını önceden tahmin ederek operasyonel maliyetler düşürülebilir. Bu entegrasyon, sistem verimliliğini artırmakla kalmayıp, bakım süreçlerini de daha öngörülebilir hale getirebilir. Uzun vadede, bu teknolojilerin yaygınlaşmasıyla endüstriler arasında veri paylaşımı ve iş birliği fırsatları artacak, bu da adsorpsiyon süreçlerini daha standart ve erişilebilir hale getirecektir.

SONUÇ

Yapay zekanın sabit yataklı kolon adsorpsiyonu süreçlerine entegrasyonu, geleneksel yöntemlerin sınırlamalarını aşarak önemli bir dönüşüm sağlayabilir. Adsorban seçimi, akış hızı ve doygunluk gibi değişkenlerin optimize edilmesi hem laboratuvar hem de endüstriyel ölçekte daha verimli süreçlere olanak sağlayacak-

tır. Özellikle makine öğrenimi ve derin öğrenme teknikleri, gerçek zamanlı kontrol ve tahmin yetenekleriyle süreçlerin dinamik koşullara uyum sağlama kabiliyetini arttıracaktır. Bunun yanı sıra, süreç maliyetlerinin düşürülmesi ve çevresel sürdürülebilirliğin desteklenmesi, yapay zeka uygulamalarının endüstriyel ölçekli kullanımlarını da daha cazip hale getirebilir. Ancak, veri kalitesine olan bağımlılık ve başlangıç yatırımlarının yüksek olması gibi zorluklar, teknolojinin daha geniş bir kullanıcı kitlesine erişimini kısıtlayabilir. Bu nedenle, daha fazla yatırım ve standartlaşma gereklidir.

Özellikle ağır metal giderimi gibi kritik alanlarda daha düşük enerji tüketimi ve daha az atık üretimi sağlanması yapay zeka kullanımı ile mümkün olabilir. Ekonomik faydalar arasında, optimize edilmiş süreçler sayesinde daha az malzeme ve enerji kullanımı öne çıkacaktır. Yapay zeka algoritmalarının doğruluğunu artırmak için büyük veri tabanlarının geliştirilmesi ve disiplinler arası iş birliğinin teşvik edilmesi önemlidir.

Kaynak:

[1] Yerli, C., Çakmakcı, T., Sahin, U., & Tüfenkçi, Ş. (2020). Ağır metallerin toprak, bitki, su ve insan sağlığına etkileri. Türk Doğa ve Fen Dergisi, 9(Özel Sayı), 103-114.

[2] Kafadar F, Saygıdeğer S. Gaziantep İlinde Organize Sanayi Bölgesi Atık Suları İle Sulanan Bazı Tarım Bitkilerinde Kurşun Miktarlarının Belirlenmesi. Ekoloji. 2010;75:41-48.

[3] Okcu M, Tozlu E, Kumlay AM, Pehluvan M. Ağır Metallerin Bitkiler Üzerine Etkileri. Alınteri Zirai Bilimler Dergisi. 2009; 17(2): 14-26.

[4] Taciroğlu B, Kara EE, Sak T. Toprakta Ağır Metal Gideriminde Solucanların Kullanımı. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üni. Doğa Bilimleri Dergisi. 2016;19(2):201-207.

[5] Seven T, Can B, Darende BN, Ocak S. Hava ve Toprakta Ağır Metal Kirliliği. Ulusal Çevre Bilimleri Araştırma Dergisi. 2008;1(2):91-103.

[6] Amar, M. B., Mallek, M., Valverde, A., Monclús, H., Myers, T. G., Salvadó, V., & Cabrera-Codony, A. (2024). Competitive heavy metal adsorption on pinecone shells: Mathematical modelling of fixed-bed column and surface interaction insights. Science of the Total Environment, 917, 170398.

[7] Hethnawi, A., Manasrah, A. D., Vitale, G., & Nassar, N. N. (2018). Fixed-bed column studies of total organic carbon removal from industrial wastewater by use of diatomite decorated with polyethylenimine-functionalized pyroxene nanoparticles. Journal of colloid and interface science, 513, 28-42.

[8] Kumar, M., Ambika, S., Hassani, A., & Nidheesh, P. V. (2023). Waste to catalyst: role of agricultural waste in water and wastewater treatment. Science of The Total Environment, 858, 159762.

[9] Amar, M. B., Walha, K., & Salvadó, V. (2021). Valorisation of pine cone as an efficient biosorbent for the removal of Pb (II), Cd (II), Cu (II), and Cr (VI). Adsorption Science & Technology, 2021, 6678530.

[10] Amar, M. B., Walha, K., & Salvadó, V. (2020). Evaluation of olive stones for Cd (II), Cu (II), Pb (II) and Cr (VI) biosorption from aqueous solution: Equilibrium and kinetics. International Journal of Environmental Research, 14, 193-204.

[11] Han, G., Oh, S., Yeo, S. J., Lee, J., & Lim, H. (2023). Eco-friendly polycaprolactone-bound diatomite filter for the removal of metal ions and micro/nanoplastics from water. Science of The Total Environment, 905, 166956.

[12] Zahara, I., Irfan, M. F., Zubair, M., Siddique, T., & Ullah, A. (2023). Removal of divalent cations and oxyanions by keratin-derived sorbents: Influence of process parameters and mechanistic studies. Science of The Total Environment, 891, 164288.

[13] Zhang, H., Luo, C., & Yan, Y. (2017). Adsorption dynamics of isopropanol in structured fixed bed with microfibrous ZSM-5 zeolite structured composite. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 80, 779-786.

[14] Abdelwahab, O., & Thabet, W. M. (2023). Natural zeolites and zeolite composites for heavy metal removal from contaminated water and their applications in aquaculture Systems: A review. The Egyptian Journal of Aquatic Research.

[15] Abdelrahman, E. A., Abou El-Reash, Y. G., Youssef, H. M., Kotp, Y. H., & Hegazey, R. M. (2021). Utilization of rice husk and waste aluminum cans for the synthesis of some nanosized zeolite, zeolite/zeolite, and geopolymer/zeolite products for the efficient removal of Co (II), Cu (II), and Zn (II) ions from aqueous media. Journal of hazardous materials, 401, 123813.

[16] Lakshmipathy, R., Balaji, G. L., & Rico, I. L. R. (2021). Removal of Pb2+ ions by ZSM-5/AC composite in a fixed-bed bench scale system. Adsorption Science & Technology, 2021, 2013259.

[17] Ganji, H., Taghavijeloudar, M., & Khodashenas, S. R. (2024). A sustainable approach for heavy metals removal from surface water by sand column amendment with bio-adsorbent of pistachio hull waste (PHW): Batch and fixed-bed column adsorption. Journal of Water Process Engineering, 67, 106061.6

[18] Ahmad, M., Lubis, N. M., Usama, M., Ahmad, J., Al-Wabel, M. I., Al-Swadi, H. A., ... & Al-Farraj, A. S. (2023). Scavenging microplastics and heavy metals from water using jujube waste-derived biochar in fixed-bed column trials. Environmental Pollution, 335, 122319.

[19] Park, S. S., Park, Y., Repo, E., Shin, H. S., & Hwang, Y. (2024). Three-dimensionally printed scaffold coated with graphene oxide for enhanced heavy metal adsorption: Batch and fixed-bed column studies. Journal of Water Process Engineering, 57, 104658.

[20] Islam, M. S., Rahaman, M. S., & Barbeau, B. (2023). Removal of Pb (II), Zn (II), Cu (II), and As (III) ions from water using kraft pulp-based carboxymethylated cellulose in a fixed-bed column adsorption process. Journal of Environmental Chemical Engineering, 11(6), 111181.

[21] Mandal, A., Bar, N., & Das, S. K. (2022). Phenol Adsorption by Biological and Industrial Wastes and ANN Modeling. In Effective Waste Management and Circular Economy (pp. 141-156). CRC Press.

[22] Bar, N., Mitra, T., & Das, S. K. (2021). Biosorption of Cu (II) ions from industrial effluents by rice husk: Experiment, statistical, and ANN modeling. Journal of Environmental Engineering and Landscape Management, 29(4), 441-448.

[23] Hippert, H. S., Pedreira, C. E., & Souza, R. C. (2001). Neural networks for short-term load forecasting: A review and evaluation. IEEE Transactions on power systems, 16(1), 44-55.

[24] Wang, J., Yang, W., Du, P., & Li, Y. (2018). Research and application of a hybrid forecasting framework based on multi-objective optimization for electrical power system. Energy, 148, 59-78.

[25] Song, K. B., Baek, Y. S., Hong, D. H., & Jang, G. (2005). Short-term load forecasting for the holidays using fuzzy linear regression method. IEEE transactions on power systems, 20(1), 96-101.

[26] Ying, L. C., & Pan, M. C. (2008). Using adaptive network based fuzzy inference system to forecast regional electricity loads. Energy Conversion and Management, 49(2), 205-211.

[27] Barman, M., Choudhury, N. D., & Sutradhar, S. (2018). A regional hybrid GOA-SVM model based on similar day approach for short-term load forecasting in Assam, India. Energy, 145, 710-720.

[28] Ceperic, E., Ceperic, V., & Baric, A. (2013). A strategy for short-term load forecasting by support vector regression machines. IEEE Transactions on Power Systems, 28(4), 4356-4364.

[29] Cao, G., & Wu, L. (2016). Support vector regression with fruit fly optimization algorithm for seasonal electricity consumption forecasting. Energy, 115, 734-745.

[30] Hong, W. C. (2010). Application of chaotic ant swarm optimization in electric load forecasting. Energy Policy, 38(10), 5830-5839.

[31] Ahmad, A. S., Hassan, M. Y., Abdullah, M. P., Rahman, H. A., Hussin, F., Abdullah, H., & Saidur, R. (2014). A review on applications of ANN and SVM for building electrical energy consumption forecasting. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 33, 102-109.

[32] Singh, P., Dwivedi, P., & Kant, V. (2019). A hybrid method based on neural network and improved environmental adaptation method using Controlled Gaussian Mutation with real parameter for short-term load forecasting. Energy, 174, 460-477.

[33] Mitra, T., Singha, B., Bar, N., & Das, S. K. (2014). Removal of Pb (II) ions from aqueous solution using water hyacinth root by fixed-bed column and ANN modeling. Journal of Hazardous Materials, 273, 94-103.

[34] Nag, S., Bar, N., & Das, S. K. (2019). Sustainable bioremadiation of Cd (II) in fixed bed column using green adsorbents: Application of Kinetic models and GA-ANN technique. Environmental technology & innovation, 13, 130-145.

[35] Batool, F., Kurniawan, T. A., Mohyuddin, A., Othman, M. H. D., Ali, I., Abdul-Kareem-Alsultan, G., ... & Chew, K. W. (2024). Rosa damascena waste as biosorbent for co-existing pollutants removal: fixed-bed column study and ANN modeling. Chemical Engineering Science, 293, 120057.

BÖLÜM 24

Plastik Enjeksiyon Kalıplarında Kalıp ve Ergimiş Plastik Sıcaklığının Enjeksiyon Sürelerine Olan Etkisinin Sonlu Elemanlar Metodu ile Analizi*

Cebeli Özek[1] & Yahya Hışman Çelik[2]

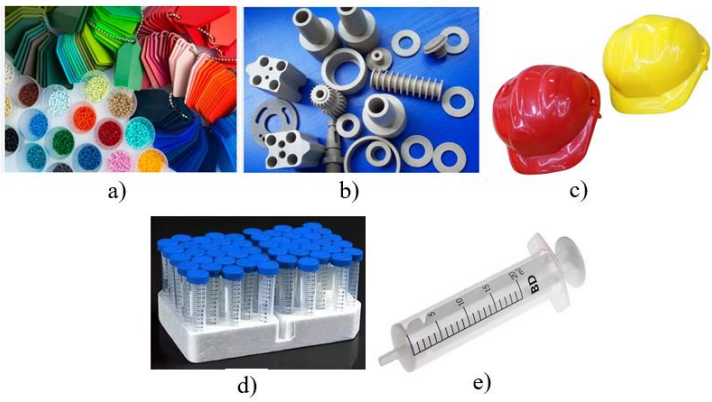
* Bu çalışma ikinci yazarın doktora tezinden üretilmiştir.

[1] Prof. Dr., Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü,
Orcid: 0000-0001-7603-415X
[2] Prof.Dr., Batman Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü,
Orcid: 0000-0003-1753-7712

1. GİRİŞ

Günümüzde oyuncaklar, otomobil parçaları, çeşitli elektronik parçalar, ev eşyaları vb. gibi ürünlerin çoğu enjeksiyon kalıplama yöntemi ile üretilmektedir. Enjeksiyon kalıplama yöntemi ile ürünler ikinci bir işlem gerektirmeden seri bir şekilde elde edilmektedirler.

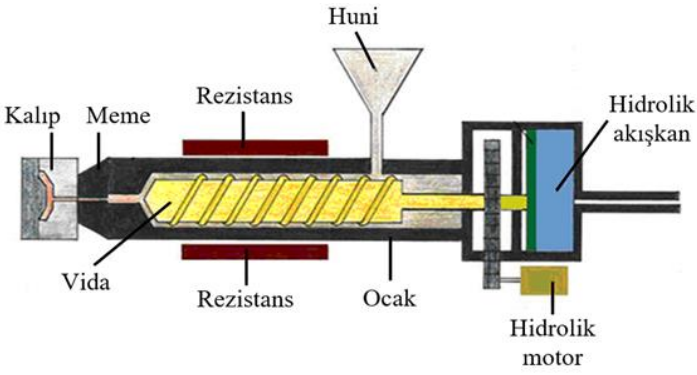
Plastik enjeksiyon, sıcaklık yardımı ile ergitilmiş plastik malzemenin bir kalıp içine enjekte edilerek şekillendirilmesi ve şekillendirildikten sonra soğutularak kalıptan çıkarılmasını içeren bir imalat yöntemidir. Bu yöntem ile en küçük parçalardan bahçe mobilyalarına kadar çok çeşitli boyut ve şekillerde plastik ürünler ve parçalar imal edilebilirler. Aşağıda Şekil 1'de plastik enjeksiyon kalıplarında üretilen çeşitli ürünler görülmektedir.



Şekil 1. Plastik enjeksiyon kalıplarında üretilen çeşitli ürünler.

Şekil 1a'da Plastik enjeksiyon üretiminde kullanılan hammadde çeşitleri, Şekilde 1b'de plastik enjeksiyon kalıp parçaları, Şekil 1c'de güvenlik ürünleri endüstriyel yapı güvenliği kaskı Şekilde 1d'de steril, esnek medikal enjeksiyon tüpü ve Şekilde 1e'ise otomatik enjeksiyon şırıngası güvenlik iğne elemanı verilmiştir.

Genel bir njeksiyon makinesi üç ana kısımdan oluşur. Kapama ünitesi (Mengene), enjeksiyon ünitesi ve kalıp kısmıdır. Şekil 2'de bir enjeksiyon makinası elemanları şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2. Enjeksiyon makinası elemanları

Kapama ünitesi, enjeksiyon ve soğutma esnasında kalıbı basınç altında tutan ünitedir. Enjeksiyon aşamasında, granül halindeki plastik malzeme enjeksiyon ünitesi üzerindeki hazneye dökülerek rezistanslı ısıtıcılar ile ısıtılan silindir içerisine oradan da bir sonsuz helezonik vida vasıtası ile kalıba alınır. Kalıp içine enjekte edilmiş olan ergimiş plastik, basınç uygulanarak kalıp boşluğunu iyice doldurması sağlanır. Daha sonra plastik, kalıp içinde katı hale gelinceye kadar soğutulur. Kalıbın iki tarafı ayrılacak şekilde açılarak iticiler vasıtası ile bitmiş parça kalıptan çıkarılır. Her alanda yaygın olarak kullanılan plastik malzemelerin artmasıyla plastik enjeksiyon ile üretim yapan firmalarda da rekabet ortamı oluşmuştur. Daha iyi şartlarda rekabet yapabilmek için iyi bir maliyet hesabının yapılması ve bunun da en kısa sürede müşteri hizmetine sunmakla mümkün olacaktır.

Bu çalışmada, plastik enjeksiyon kalıplarının ve bu kalıplarda üretilecek olan ürünlerin optimum olarak elde edilmesi için sonlu elemanlar analizi ve deneysel çalışmalar sonucu elde edilen enjeksiyon süreleri karşılaştırılmıştır. Bunun için istenilen kalıp malzemesi, katkı malzemeleri, enjeksiyon makinesi ve üretilecek olan plastik parçanın geometrik boyut ve özellikleri dikkate alınması önem arz etmektedir. Kalıplanan ürün için kalıbın boyutlarını, bu kalıpta kaç adet plastik parça üreteceğini, kalıplanan üründe çekme miktarının ne kadar olacağını, kalıplanan ürün için mengene basıncını, nasıl bir soğutma sistemi döngüsü yapılacağını, yollukların özelliklerini ve hava boşluklarının nasıl olması gerektiği önemli olmaktadır. Plastik enjeksiyon kalıplama teknikleri ile üretilen plastik parçaların

seri ve kolay bir şekilde üretilmesi kullanım alanını gün geçtikçe arttırmaktadır. Ancak, plastik enjeksiyon kalıplama yöntemleri ile üretim yapılırken fazla kalıplama parametrelerinin olması bazı sorunları beraberinde getirmiştir.

Ergüney ve diğerleri [1] yaptıkları çalışmada, spiral kanallı bir kalıpta farklı enjeksiyon parametrelerini (silindir sıcaklığı, enjeksiyon basıncı, enjeksiyon debisi ve kalıp sıcaklığı) ele alarak plastiklerin akış özelliklerini incelemişlerdir. Enjeksiyon parametrelerinin değerleri arttıkça akış uzunluğunun arttığını, en uzun akışın sırasıyla polistren (450 mm), polipropilen (428 mm), yüksek yoğunluklu polietilen (341 mm) ve düşük yoğunluklu polietilen (324 mm) olduğunu belirtmişlerdir. Çakır ve diğerleri [2] I20-3 polietilen plastik ürünlerdeki çekme miktarını, enjeksiyon parametrelerini ve kalıp özelliklerinin etkilerini deneysel olarak araştırmışlardır. Yaptıkları deneylerde enjeksiyon sıcaklığı, enjeksiyon basıncı, katkı maddesi oranı ve kalıplama süresinin plastik ürünlerdeki çekme miktarına olan etkilerini grafikler halinde göstermişlerdir. Enjeksiyon basıncı ve kalıplama süresinin artması ile çekmenin azaldığını, katkı maddesi ve enjeksiyon sıcaklığının artmasıyla çekmenin arttığını tespit etmişlerdir. Güldaş ve diğerleri [3], plastik enjeksiyon kalıplarında, kalıp boşluğu içerisinde ergimiş plastiğin akışının matematiksel modellemesi için temel denklemler geliştirmişlerdir. Kalıp boşluğunu iki boyutlu olarak ele aldıkları çalışmalarında, Phoenics programı ile yapılan çözümlemede, yoğunluğun değişimlerini Boussinesq Yaklaşımı'na göre hesaplamışlar ve plastiğin kalıp boşluğuna doluşunu incelemişlerdir. Oktem ve diğerleri [4] plastik parçaların üretimi esnasında, çekme payı değişimine bağlı olarak, hata problemlerini azaltmak için optimizasyon teknikleri içeren bir çalışma yapmışlardır. Moldflow analizi ile L_{27} ve L_9 Taguchi ortogonal tasarımın temel dağılımlarından yararlanarak çarpılmaya ve çekmeye etki eden parametrelerin değişimlerini analiz etmişlerdir. Ünal ve Taşdemir [5], Dişli çarklarda hasar oluşumunun genellikle temas yüzeylerinde yorulma şeklinde meydana geldiğini teorik olarak hesaplamış ve sonlu elemanlar yöntemi ile analiz etmiştir (FEM). Çalışmada teorik hesaplamalar ile sonlu eleman analiz sonuçlarının uyum içinde olduğunu ve yüksek devir sayılarında temas gerilmelerinin azaldığını tespit etmiştir. Ünal ve Özek [6], açısal derin çekme kalıplarında kare profilli kaplarda çekme mukavemeti, et kalınlığı ve kap yüksekliğine ilişkin çekme parametrelerinin deneysel olarak doğrulanması için bir Sonlu elemanlar analizi yapmışlardır. Sonlu elemanlar analiz sonuçları ile deneysel sonuçlar karşılaştırılarak açısal derin çekme kalıplarının geleneksel kalıplara göre daha iyi sonuçlar verdiğini, sonlu elemanlar modeli sonuçları ile deneysel çalışma sonuçlarının uyumlu olduğunu ifade etmişlerdir. Karaağaç [7], plastik ürünlerin dayanımını önemli ölçüde azaltan ve makine elemanının görevini tahmin edilen ömründen önce sona erdiren,

kaynak hatları ve oluşumu üzerine araştırma yapmıştır. Uluslararası standartlarda tavsiye edilen ölçülere uygun olarak çekme, yorulma ve çentikli darbe deneyi numuneleri basabilen bir enjeksiyon kalıbının tasarımını ve imalatını gerçekleştirmiştir. Yaptığı deneysel çalışma ile enjeksiyon sıcaklığının, enjeksiyon basıncının ve ütüleme süresinin plastik ürünlerde kaynak hattı kalitesine etki eden en önemli enjeksiyon parametreleri olduğunu belirtmiştir. Uluer [8], yaptığı çalışmada, hazırlanan deney setine yerleştirilen kamera vasıtasıyla bir tarafına cam plaka yerleştirilen kalıp boşluğundaki ergimiş plastiğin akışını gözlemlemiştir. Ayrıca, plastiğin akış davranışını ve kalıbı doldurma tipini incelmiştir. Buna göre, ergimiş plastiğin kalıp boşluğu içerisindeki akışını etkileyen en önemli parametrenin basınç olduğunu ve yerçekiminin de plastiğin akışını etkilediği tespit etmiştir. Ayar [9] yaptığı çalışmada, halojen lamba kasasının bilgisayar ortamında üretim ve analizini gerçekleştirmiştir. Analiz sonucunda kalıbın tasarım modeline göre gerekli olan CNC kodlarını çıkarmış ve kalıp parçalarının üretimi için en uygun işleme süresini elde etmiştir. Ayrıca, halojen lamba kasasının üretiminin teknik ve ekonomik bakımdan kalıplama yöntemini tespit etmiştir. Can [10], yaptığı çalışmada, kolay üretilebilirliği ve ekonomik olması nedeniyle plastik dişli çark üretimini yapmıştır. Plastik dişli çark modelinin içerisine, farklı çaplarda yaylı tel dizmiştir. Enjeksiyon kalıplama öncesinde bu yaylar çekilip daha sonra da bırakılarak dişlide ön gerilme oluşturulmuştur. 142 adet hazırlanan numuneden 58 tanesinde gözenek oluşumu gözlemiştir. 84 adet numune de ise yay takviyesinin statik kopma ve yorulma dayanım değerlerini iyileştirdiği sonucuna varmıştır. Sadeghi [11] plastik enjeksiyon kalıpları için yapay sinir ağlarıyla ilgili bir çalışma yapmıştır. Ağ'a değişik plastik ürün, enjeksiyon parametresi, kalıp sıcaklığı ve erime sıcaklığı gibi değişkenler girilirken, bu değişkenlere bağlı olarak kalıp kalitesi, dolma süresi ve enjeksiyon basıncı gibi parametrelerin nasıl değiştiğini CAE yazılımını kullanarak çıkartmıştır. Ünal [12], çapı 16 mm ve adımları 2 mm olan cıvataları kullanarak vida dişlerinin çekme kuvvetine etkisini belirlemek amacıyla trapez ve kare profilli vidalarda von-Mises eşdeğer gerilmelerinin ve toplam deformasyonun belirlenmesi için sonlu elemanlar analizi uygulamıştır. Metrik diş profilinin hem sonlu elemanlarda hem de deneysel çalışmalarda en iyi sonucu verdiğini, sayısal ve deneysel sonuçların uyumlu olduğunu ifade etmiştir. Ferreira ve Mateus [13] plastik enjeksiyon kalıpları için farklı soğutma sistemlerini geliştirmek ve kalıptaki problemleri azaltmak üzere algoritmik matris yöntemi geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri matris yöntemi ile plastik enjeksiyon kalıplarında oluşacak problemlerin önceden görülmekte olduğunu ve gerekli değişikliklerin yapılarak kalıpların hatasız üretimi yapıldığını belirtmişlerdir. Acar [14] plastik enjeksiyon kalıpları için ürünün üç boyutlu katı modelini

esas alarak yapmış olduğu çalışmada, soğutma sistemi için otomatik olarak bilgisayara yerleştirilen kalıp çekirdeklerinin tasarımını gerçekleştirmiştir. Karaağaç ve Özdemir [15] yaptıkları çalışmada, plastik enjeksiyon kalıpları için klasik maliyet hesabı yöntemlerini Delphi programlama dilini kullanarak bilgisayar ortamına aktarmışlardır. Tasarım için AutoCAD ve tasarlanan şeklin işleme sürelerini tespit etmek için de MasterCAM programından yararlanmışlardır. AutoCAD ve MasterCAM ortamından elde ettikleri verileri, kalıp maliyeti hesabında kullanılacak şekilde Delphi ortamına transfer ederek plastik enjeksiyon kalıbının tasarımını, üretimini ve maliyet hesabını karşılaştırmışlardır. Nezhad ve Siores [16] enjeksiyon kalıplarındaki kalıp parametrelerine (Erime sıcaklığı, Kalıp sıcaklığı, Enjeksiyon süresi ve gerekli Basınç) akıllı bir sistemle yaklaşımda bulunmuşlardır. CBR tekniğini ve Hybrid uzman sistemi kullanarak optimum sınırlama içerisinde akış uzunluğu ve akış kalınlığının değişimini incelemişlerdir. Buna bağlı olarak plastik enjeksiyon kalıp parametrelerine etki eden faktörler arasındaki ilişkiyi gösteren bir formül geliştirmişlerdir. Özçelik ve Erzurumlu [17], yaptıkları çalışmada, çamaşır makinesinin PC düğmesinin plastik enjeksiyonla kalıp sıcaklığının, erime sıcaklığının, kalıplama basıncının, kalıplama zamanının ve soğutma zamanının malzemenin doluş şeklini ve minimum eğilmesini nasıl etkilediğini analiz etmişlerdir. Taguchi ortogonal sıra ve sonlu elemanlar yazılımı Moldflow'u bu çalışmada kullanmışlardır. Ünal ve Karaca [18], tornalama işleminde kesme hızı, ilerleme hızı ve kesme derinliği gibi parametrelerin kesme sıcaklığına ve kesme kuvvetine etkisini ANSYS Workbench'te sınır koşullarına uygun olarak araştırmış, sıcaklık dağılımı ve kesme kuvvetlerini incelemişlerdir. Tornalama parametreleri arttıkça hem sıcaklık hem de kesme kuvveti artığını ifade etmişlerdir. Tang ve diğerleri [19], yaptıkları çalışmada, kalıplarda artan ısı geriliminin etkilerini ve ısı performansı analizini deneysel bir çalışma yaparak gerçekleştirmişlerdir. Plastik enjeksiyon kalıplarının tasarımı için Unigraphics13 versiyonlu bilgisayar yazılımını kullanmışlardır. Numune yüzeyleri dengesiz soğutmadan dolayı ısı gerilimine maruz kaldığını ve dengesiz soğutma, kalıp bölgesinin farklı bölgelerinde eğilme meydana gelmesine neden olduğunu belirtmişlerdir. Sonuç olarak çekme paylarının soğutma kanalına yakın olan bölgelerde meydana geldiği saptamışlardır. Kahraman [20], yaptığı çalışmada; sıcak yolluk sisteminin genel tanımını, ihtiyaç duyulduğu alanları ve sıcak yolluk kullanılmasının avantajlarını içeren bir literatür araştırması hazırlamıştır. Kovacs ve Bercsey [21] kalıp yapımında kullandıkları malzemelerin ısıl iletim katsayısının kalıp kalitesine etkisini araştırmışlardır. Isı iletim kat sayısı az olan kalıp malzemelerinde, kalıp boşluğu ile soğutma sistemi arasında fazla ısı alış verişi olmadığından dolayı çekme miktarının fazla olduğunu, ısı iletim kat sayısı fazla olan kalıp malzemelerinde ise ısı alış verişi kolay olduğundan dolayı daha az çekme meydana

geldiğini gözlemlemişlerdir. Chen ve diğerleri [22] enjeksiyon kalıplarının, soğutma aşamasında meydana gelen fiziksel değişimlerini göz önünde bulundurarak, ısı-viskoelastisite teoremleri arasında bazı matematiksel formüller çıkartmışlardır. Bu formülleri çıkartırken sonlu farklar metodundan yararlanmışlardır. Shiou ve Chen [23], plastik enjeksiyon kalıplarının yüzeylerindeki pürüzlülüğün kalıplanan parçaya etkilerini araştırmışlardır. Yüzey pürüzlülüğü için takım geometrisinin özelliklerini belirleyerek, tasarlanan takımın kalıp parçası yüzeyine belirli kuvvet, hız ve ilerlemede gezdirilerek kalıp yüzeyindeki pürüzlülüğünü (R_a) gidermişlerdir. Bu amaçla kalıpların yüzeyinde cilalama işlemini sağlamışlardır. Lau ve diğerleri [24] plastik enjeksiyon kalıplarında yapay sinir ağ ve bulanık mantık sistemlerini kullanarak bir çalışma yapmışlardır. Yapay sinir ağı ile enjeksiyon süresi, soğutma zamanı, işleme zamanı ve işleme basıncı gibi giriş parametrelerinin kalıplanan parçaya etkisini araştırmışlardır. Bulanık mantık sistemi ile ise kalıp ölçülerinin değişimini iterasyon sayısı ile ilişkilendirmişlerdir. Güldaş ve diğerleri [25], enjeksiyonla kalıplamada, ergimiş plastiğin akış davranışının teorik olarak belirlenmesi ve akış simülasyonu için gerekli olan viskozite ve yoğunluk değerlerinin kayma hızı, sıcaklık ve basınca bağlı olarak hesaplanabildiğini belirtmişlerdir. Ergimiş plastik malzemenin kayma hızının, sıcaklık ve basınca bağlı olarak viskozite ve yoğunluk değerlerini hesaplayan ve grafik olarak veren bir yazılım geliştirmişlerdir. Kurtaran ve diğerleri [26], otobüslerde kullanılan lambaların plastik kısımlarının enjeksiyonla kalıplanırken, kalıplama parametrelerine bağlı olarak plastik parçada minimum eğilme meydana gelmesini sağlamaya çalışmışlardır. Eğilmeye etki eden en önemli parametrelerin kalıp sıcaklığı, erime sıcaklığı, paketleme basıncı, paketleme basınç zamanı ve soğutma zamanı olduğunu belirtmişlerdir. Li ve diğerleri [27], yaptıkları çalışmada, soğutma sistemlerinin plastik enjeksiyon kalıbının en önemli unsuru olduğunu belirtmişlerdir. Farklı soğutma sistemleri tasarlayarak en iyi soğutma sisteminin kalıp üzerinde maksimum dolaştırılarak elde edilebileceğini teorik ve deneysel olarak kanıtlamışlardır. Qiao [28], yaptığı çalışmada, soğutma sistemlerinin plastik enjeksiyon kalıpları için önemli olduğunu, soğutma sisteminin üretilecek ürünün kalitesini büyük ölçüde etkilediğini ifade etmiştir. Bunun için bir sistematik bilgisayar yardımı uygulaması ile soğutma sisteminin optimum tasarlanmasını sağlamıştır. Optimum soğutma sağlandığı zaman ürünün kalitesinin arttığını belirtmiştir. Seow ve Lam [29] plastik enjeksiyon kalıplarının optimum akışını sağlamaya yönelik yaptıkları çalışmada farklı geometriye sahip kalıp modellerini karşılaştırmışlardır. Optimizasyon tekniklerini kullanarak bu kalıp modellerinin Fortran programlama dilinde yazılımını yapmışlardır. Beiter, Cardinal ve Ishii [30] yaptıkları çalışmada, üretilecek parçanın geometrik şeklini ve kullanılan kalıp malzemesinin özelliklerini göz önünde tutarak enjeksiyon kalıplarının üretim

maliyetini hesaplamışlardır. Liparoti ve arkadaşları [31], yaptıkları çalışmada, izotaktik polipropilen prosesi sırasında hızlı bir kalıp yüzey sıcaklığı değişimi elde etmek için ince çok katmanlı ısıtıcılar kullanmışlardır. Kalıp sıcaklığının enjeksiyon basıncı üzerindeki etkisini analiz ederek hem numune katılaşması hem de kalıp deformasyonu üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Kalıp yüzey sıcaklığının hızlı bir şekilde kontrol edilmesiyle enjeksiyon basıncında bir azalmanın olduğunu ifade etmişlerdir. Aminabadi ve arkadaşları [32], yaptıkları çalışmada, Endüstri 4.0'a uygun olarak tam otomatik bir kapalı çevrim enjeksiyon kalıplama işlemi yapmışlardır. İşlemde bir yapay zeka kontrol sistemi geliştirmişlerdir. Enjeksiyonla kalıplanmış parçaların yüzey kalitesini, yeni bir yaklaşımla toplanan verilerle eğitilen ResNet-18 evrişimli sinir ağı kullanılarak belirlemişlerdir. Ardestani ve diğerleri [33], yaptıkları çalışmada, numune yüzeylerinde oluşan hasarlarıda etkili olan parametrelerin belirlenmesi amacıyla bir tasarım geliştirmişlerdir. Deneysel tasarım, sonlu elemanlar analizi (SEA) ve ANOVA'nın kombinasyonunu kullanılarak en önemli parametreleri (nozul çapı, tutma basıncı, akış hızı ve erime sıcaklığı) belirlemişlerdir. Ayrıca etkili bir tahmin modeli sağlamak için temel yapay sinir ağları ve makine öğrenmesi yöntemlerini uygulamış ve performansları analiz etmişlerdir. Temel yapay sinir ağının (YSA) ortalama %1,3 hatayla sonlu elemanlar analizi (SEA) sonuçlarına en yakın tahminleri sağladığını tespit etmişlerdir.

Literatür incelendiğinde kullanılan plastik malzeme ve numunenin geometrik özelliklerine bağlı olarak akış uzunluğunun incelenmesi, üretilecek üründe minimum eğilme ve çarpılmaya yönelik enjeksiyon parametrelerinin değişik teknikler kullanılarak ayrı ayrı ele alındığı, ancak çekme miktarları, enjeksiyon ve soğutma zamanlarının ürünün kalitesi üzerindeki etkileri ile ilgili çalışmaların sınırlı olduğu görülmüştür. Bu çalışmada plastik enjeksiyon kalıplarında elde edilen ürünün kalitesi üzerinde çekme miktarları, enjeksiyon ve soğutma zamanlarının etkileri araştırılmıştır.

2. Plastik Enjeksiyon Kalıpları ve Temel Bilgiler

2.1. Plastik Enjeksiyon Kalıplama Yöntemleri

Günümüzde plastiklerin % 25'i, enjeksiyon kalıplama metoduyla parça üretiminde kullanılmaktadır. Bu tür üretimlerde plastik malzeme, kalıp ve enjeksiyon makinesine ihtiyaç duyulmaktadır. Bunlar ayrıntılı olarak irdelendiğinde plastik enjeksiyon kalıplama teknikleri hakkında ayrıntılı bilgiye ulaşılacaktır. Plastikler çok geniş uygulama alanına sahiptirler.

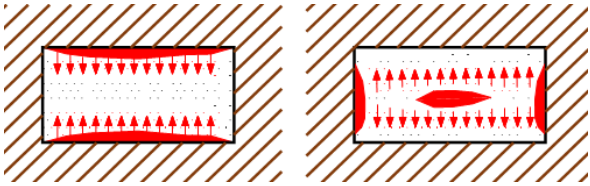
Polimerler genellikle amorf yapıya sahiptirler, Uzun ve karmaşık yapılı zincirlerin komşuları ile uyum sağlayıp düzenli yapı meydana getirmeleri çok zordur. Bir lineer polimerin genel görünüşü pişmiş makarnayı andırır, zincirler birbirleriyle etkileşim halinde bulunur. Ancak basit yapılı ve simetrik polimerlerde polietilen izotaktik propilen gibi bazı koşullarda yerel düzen oluşabilir. Amorf ana yapı içinde oluşan küçük kristal yapılı bölgelere kristalitler denir. Kristalitlerin yoğunluğu amorf yapıya göre % 5–10 kadar daha büyüktür. Örneğin, endüstride kullanılan yüksek yoğunluklu polietilende % 90 oranında kristalleşme nedeni ile yoğunluk 0,96 gr/cm³, düşük yoğunluklu amorf polietilende ise 0,92 gr/cm³ dür. Soğuma hızı yavaş olursa kristalleşme olanağı artar. Kristalleşme dış kuvvet etkisinde de oluşabilir. Gerilen molekül zincirleri paralel hale gelerek yer yer uyum sağlayabilirler. Bu şekilde doğan kristaller kuvvet doğrultusuna paralel olurlar. Kristallerin büyüklüğü 50–100 A° civarındadır. Molekül zincirleri ise bu boyuta göre çok daha uzundur. Bazıları birkaç kristalit içinden geçerek uzanırlar. Kristallik derecesi arttıkça mekanik özellikleri ve yumuşama sıcaklığı yükselir.

2.2. Plastiklerin Mekanik Özellikleri

Termoplastikler genellikle sünek ve kırılmadan önce plastik şekil değiştirirler. Mekanik özellikleri önemli ölçüde yükleme süresine ve sıcaklığa bağlıdır. Oda sıcaklığında sabit gerilme altında sünme nedeni ile sürekli şekil değiştirirler. Termoset plastikler ise gevrektir ve plastik şekil değiştirme olmadan kırılırlar. Sıcaklık artıkça mukavemetleri düşer. Fakat yumuşamazlar. Aşırı sıcaklıkta ayrışırlar ve kavrulurlar. Plastiklerin elastisite modülleri düşük ve genellikle de metallerin 1/100'ü kadardır [37].

2.3. Plastik Malzemelerde Çekme

Enjeksiyonla kalıplama sırasında oluşan plastik malzemelerdeki çekme, erimiş plastiğin kalıp boşluğundan katılaştıktan sonraki boyutsal ve geometrik boyutlarının bozulmaları olarak tanımlanmaktadır. Çekme, plastiğin katılaşma sırasında enjeksiyon parametreleri veya kalıplanan parçanın şekline göre içerden dışarı veya dışarıdan içeriye doğru çekilmeye (büzülmeye) maruz kalmasıdır [2]. Şekil 3'de enjeksiyonla kalıplama sırasında oluşan plastik malzemelerdeki çekme şematik olarak ifade edilmiştir.



Şekil 3. Enjeksiyonla kalıplama sırasında oluşan plastik malzemelerdeki çekme [2].

Kalıplanan parçalarda ısı ve basınç farkından dolayı oluşan gerilmeler, malzemenin çekme veya çarpılmasına neden olmaktadır. Çekme miktarına etki eden faktörler, kalıplanan parçanın şekli, et kalınlığı ve et kalınlığı değişimi, girişin tipi, girişlerin sayısı ve girişler arası mesafe ve plastiğin kristalleşme oranıdır. Ayrıca, enjeksiyon basıncı, enjekte sıcaklığı, tutma basınçları ve katkı maddesi çekme miktarına etki eden parametrelerdir [2, 4, 17, 24].

Plastiklerin ısıl genleşme katsayıları yüksek olmasından ve kristalleşme oranlarından dolayı enjeksiyonla kalıplamada çekme kaçınılmaz olmaktadır. Plastik ürünlerdeki çekmenin, kalıplama işleminden sonra da devam ettiği bilinmektedir. Çekme miktarının büyük bir kısmı kalıplama sırasında oluşmakla birlikte, az da olsa ürünün kullanım ömrü boyunca da etkisini sürdürmektedir.

Enjeksiyonla kalıplanmış plastik ürünlerin soğutulması sırasında oluşan çekmeye etki eden birçok faktör bulunmaktadır. Bunlar [2];

-Enjekte sıcaklığı,

-Enjekte basıncı,

-Soğutma süresi,

-Katkı maddesi,

-Plastik hammaddesinin cinsi,

-Plastik kristalleşme oranı,

-Kalıplanan parçanın şekli,

-Kalıplanan parçanın et kalınlığı ve et kalınlığı değişimi,

-Giriş tipi, girişlerin sayısı ve girişler arası mesafe,

-Kalıp boşluğunun doldurma tipi, şeklinde sayılabilirler.

En yaygın kullanılan plastik malzemeler ve enjeksiyon sıcaklıklarındaki çekme değerleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Plastik malzemeler ve enjekte sıcaklıklarındaki çekme değerleri [2].

Malzemenin adı ve sembolü	İşleme sıcaklığı (°C)	Kalıp sıcaklığı (°C)	Enjeksiyon basıncı (kPa/cm²)	Çekme payı (%)
Polietilen düşük yoğunluklu (AYPE)	220–260	20–60	600–1500	1,5–3
Polietilen yüksek yoğunluklu (YYPE)	240–280	20–60	600–1500	2–4
Polipropilen (PP)	250–270	50–75	800–1800	1–1,25
Polistiren (PS)	180–280	10–100	600–1800	0,3–0,6
Stirol akrilnitrik Kopolimer (SAN)	180–270	50–80	600–1800	0,5–0,7
Polivinilklorür sert (PVC)	180–210	30–50	1000–1800	0,5
Polimetilmetakrilat (PMMA)	210–240	50–70	700–1000	0,1–0,8
Poliamid 6 (PA)	240–260	70–120	900–1400	0,5–2,2
Poliamid 6,6 (PA)	260–290	70–120	900–1400	0,5–2,2
Polieksimetilen (POM)	200–210	90	800–1700	1,9–2,3
Polikarbonat (PC)	280–320	80–100	800–1500	0,8
Politereftalasitester (PBTB)	240–260	60–80	1000–1200	1,5–2,5
Politereftalasitester (PETB)	260–290	140	1200–1400	1,2–2
Selilozasetat (CA)	180–230	50–80	800	0,5
Selilozasetabutirat (CAB)	180–230	50–80	800	0,5

Plastik enjeksiyon kalıplarında sıcak malzemenin soğuması ve üzerinden basıncın kalkmasıyla çekme meydana gelmektedir. Bu çekme miktarını mümkün olduğu kadarıyla azaltmak, ürünün fonksiyonel yapısını ve ömrünü bozmayacak değerde çekmek mümkündür. Ürün özellikle tam ölçüsünde isteniyorsa, kalıp çekme miktarı kadar büyük yapılmalıdır. Tam ölçüye getirme işlemi, incelenmiş olan parametrelerin etkisi dikkate alınarak yapılan değişiklerle sağlanmaktadır.

2.4. Plastik Enjeksiyon Kalıp Tasarımları ve Elemanları

Enjeksiyon kalıplama metoduyla termoset ve termoplastik malzemelerden parça üretilmesi kısa zamanda gelişerek plastik endüstrisinde önemli bir yer almıştır

Enjeksiyon kalıplama metodu ile plastik malzeme kalıp içerisine enjekte edilir. Kalıp içerisindeki plastik malzeme katılaşınca kalıp otomatik olarak açılır [35].

Enjeksiyon işleminin en önemli elemanından biri, belki de en önemlisi kalıptır. Çünkü baskı kalıba yapılır. İki veya daha fazla parçadan oluşan kalıplar, üretilen her parça için farklı yapıda ve özelliktedir.

Plastik enjeksiyon kalıplarında bir kalıp;

-Erimiş malzemenin kalıp boşlukları içerisinde rahatça akışını sağlayabilmeli,

-Erimiş malzemeye istenen son şeklini verebilmeli,

-Son şeklini almış malzemeyi soğutup ürün haline getirebilmeli (çapraz örgülü malzemeleri-lastik gibi-ısıtabilmeli),

-Ürünü sağlıklı bir şekilde dışarı alabilmelidir.

Bir kalıp ana olarak dört parçadan oluşur.

1. Yolluk sistemi: erimiş malzemeyi alır ve kalıp boşluklarına dağıtır.

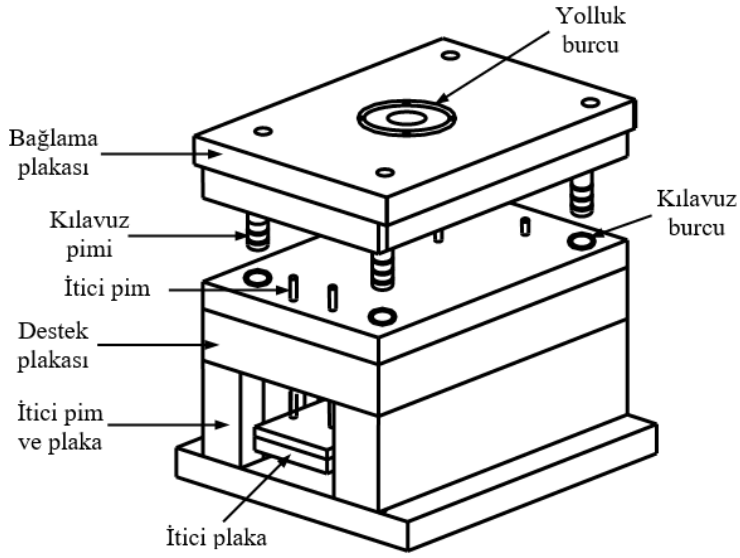
2. Kalıp boşluğu: erimiş malzemeye son şeklini verir.

3. Isı sistemi: erimiş malzemeyi soğutur (veya ısıtır).

4. İtici sistemi: ürün haline gelmiş malzemeyi kalıp dışına atar [36].

Kalıp tasarımı; enjeksiyon presi, kalıp yapımcısı ve kalıbı kullanacak operatörün çalışma şartları göz önünde bulundurularak yapılır. Ayrıca, kalıplama toleransı, çekme payı miktarı, kalıp boşluğunun yüzey kalitesi ve kalıplanacak plastik maddenin diğer özellikleri de göz önünde bulundurulur. Mümkünse, tasarımı yapılacak kalıpla üretilecek parçanın bir modeli yapılır. Model olarak plastik, metal, alçı, kil, ağaç, karton, kâğıt veya diğer malzemelerden yararlanılır [35].

Kalıp elemanları denildiği zaman üzerinde bulunan bütün parçalar akla gelmektedir. Bunlar dişi kalıp, zımba, maça veya maça pimi, itici pimler, dişi kalıp ve zımba çerçevesi, yolluk burcu, kalıp seti ve gövdesi ve benzeri elemanlardır [35]. Şekil 4'de enjeksiyon kalıbı ve elemanları gösterilmektedir.



Şekil 4. Örnek bir enjeksiyon kalıbı ve önemli parçaları [35].

Yerleştirme bileziği, sabit veya hareketli kalıp üzerindeki yolluk burcu ile enjeksiyon memesinin aynı merkezde çalışmasını sağlar. Yolluk burcunun plastik giriş ağzı içbükey küresel yüzlü yapılarak, dışbükey küresel yüzlü enjeksiyon memesine uyması sağlanır. Ayrıca, yolluk burcunun plastik giriş ağzı kavis yarıçapı, enjeksiyon memesi ucu kavis yarıçapından biraz büyük yapılır ve burç ağzında sertleşen artık plastik malzemenin enjeksiyon memesi oturma yüzeyinde kalması sağlanır.

Bağlama plakaları ve kılavuz pimleri, kalıplama boşluğunu oluşturan kalıp yarımlarının desteklenmesinde kullanılan en önemli kalıp elemanlarındandırlar. Bunlar kalıp dayanımını artırmak amacıyla kullanılabileceği gibi, kalıp elemanlarının montajını da kolaylaştırmaktadır. Kalıp yarımlarının aynı konumda açılıp kapanmasını sağlamak amacıyla, ara plakalarına veya kalıba iki ile dört adet kılavuz pimi ve burcu yerleştirilir. Kılavuz burçları, kılavuz pimleri üzerinde sürtünerek çalışır ve kalıp elemanlarını sabit bir konuma getirir. Kalıbın çalışma kurs boyu göz önünde bulundurularak kılavuz pim boyları seçilir. Seri çalışan kalıplarda kullanılan kılavuz pimi ve burçları zamanla aşınabilir. Aşınma sonucunda meydana gelebilecek boşluğun iki katı hata, kalıplanan parçaya doğrudan yansır.

Bu nedenle, zamanla aşınan kılavuz pimi ve burcu yenisi ile değiştirilmelidir [35].

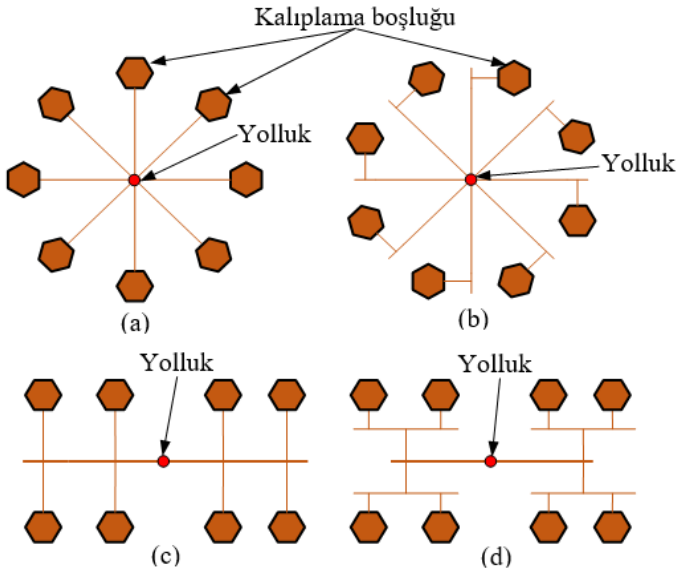
Plastik enjeksiyon kalıplarında itici pimler, burçlar ve plakalar önemli bir yer tutarlar. Herhangi bir kalıptan ürün elde edebilmek için kalıbın en az iki parçadan meydana gelmesi gerekir. Baskı yapıldıktan sonra kalıp, bölme çizgisinden ayrılır ve ürün haline gelmiş malzeme ya elle alınır yada bir itici sistem tarafından kalıptan dışarı atılır. Kalıbın özelliğine göre pimlerden veya halkalardan meydana gelen kalıp iticisi, kalıp açıldığında ürünün kaldığı tarafta yani hareketli plaka tarafında, kalıp içinde gömülü olup kalıp açıldıktan sonra ürünü dışarı iter [37].

Kalıp yarımlarının açılıp kapandığı ve kalıplanan parçanın açılma düzlemi üzerinde meydana gelen çizgiye, kalıp açılma çizgisi (K.A.Ç) denir.

Kalıplanacak parçanın biçim ve boyutlarına göre, kalıbın birden fazla açılma çizgisi bulunabilir. Açılma çizgisi sayısına göre de kalıplar birkaç parçaya ayrılır. Ayrıca kalıplanacak parçanın biçimi, üretim sayısı, parçaya verilecek eğim açısı, boyutsal toleranslar, enjeksiyon kalıplama metodu, parçanın estetik görünüşü, ön kalıplama işlemi, parça içerisine konacak plastik taşıyıcılar, hava ve tahliye kanalı, parça kalınlığı, kalıplama boşluğu sayısı ve yerleşim planı ve giriş kanalı tipine göre kalıp açılma çizgisi sayısı belirlenir.

Kalıplanan parçanın kalıp içerisinden kolayca çıkartılabilmesi için kalıplama boşluğu, kalıp açılma çizgisine doğru bir miktar konikleştirilir. Kalıplama derinliği az olan kalıplarda, kalıplama boşluğundan kalıp açılma çizgisine doğru 1/4°-1/2° arasında, derinliği fazla olan kalıplarda bu miktar parçanın estetik görünüşünü bozmayacak şekilde 1°'ye kadar verilebilir.

Çoklu kalıplama boşluğu bulunan kalıplardaki dağıtıcı kanalların boşluklarının tipleri şekil 5'de gösterilmiştir. Şekil 5a'da radyal dağıtıcı kanallar, kalıplama boşluğuna direkt olarak açılmaktadır, Şekil 5b' deki tercih edilen dağıtıcı kanallar, sıcaklığı fazla olan plastik maddenin kalıplanmasında ve kalıplama boşluğu düzgün kollara ayrılmış kalıplarda kullanılır.



Şekil 5. Çoklu kalıplama boşluğu bulunan kalıplarda dağıtıcı kanallar [35].

a) Merkezden çevreye (zayıf), b) Merkezden çevreye (iyi),

c) Standart, d) H tipi

Çoklu kalıplama boşluğu olan kalıplarda, bütün boşlukların aynı anda doldurulması veya plastik maddenin bütün boşluklara aynı oranda akması gerekmektedir. Kalıplama boşluklarına akan plastik madde oranı farklı ise, bazı kalıplama boşlukları boş kalacak ve kalıplama işlemi tam olarak yapılamayacaktır [35]. Dağıtıcı kanal ile kalıplama boşluğunu birbirine bağlayan belli biçim ve boyutlardaki kanallara, giriş kanalı denir.

Giriş kanalları, yeterli miktardaki plastik maddenin kalıplama boşluğuna girmesini ve kalıbı doldurmasını sağlar. Ayrıca, kalıplanan parçanın çekme payını bir miktar önler. Giriş kanallarının boyutları, tipi ve yerleşim planı kalıplanan parçaya etki ederek fiziksel özelliklerini değiştirir. Bu nedenle giriş kanalı boyutları, kalıplanacak plastik maddenin cinsine, kalıplama hacmine, dağıtıcı kanal boyutlarına ve enjeksiyon basıncına göre seçilir.

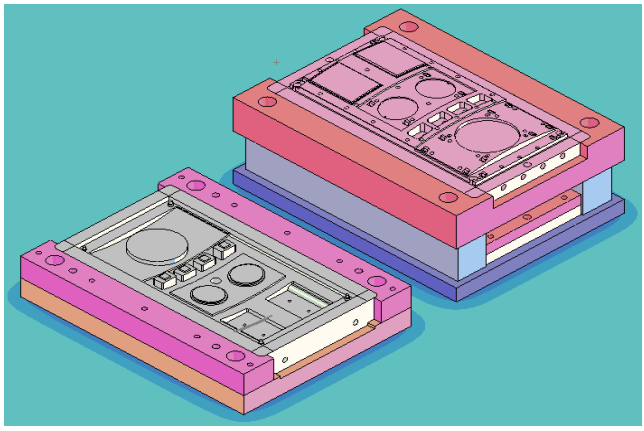
3. Deneysel Çalışmalar ve Sonlu Elemanlar Analizi

Plastik enjeksiyon kalıplama teknikleri ile elde edilen ürünlerin gün geçtikçe kullanım alanları artmakta ve buna bağlı olarak kalıplama teknikleri ile ilgili problemlerde artış görülmektedir. Bu problemler, farklı amaçlar için üretilecek kalıp tasarımları arasındaki fark, kalıp tasarımına bağlı olarak kalıp maliyetini, kullanılan plastik malzeme ve numunenin geometrik özelliklerine bağlı olarak akış uzunluğu, üretilecek üründe minimum eğilme ve çarpılmaya yönelik enjeksiyon makinesinin parametre değerleri vb. verilebilir. Bu problemler farklı yaklaşımlar kullanılarak minimuma indirgenebilmekte ve problemlerin giderilmesi için farklı sayısal çözümleme teknikleri, hazır paket programlar ve deneysel çalışmalar yapılmıştır. Sayısal çözümleme teknikleriyle enjeksiyon süresi ve soğutma zamanı bulunmakta, hazır paket programlarla kalıp maliyeti hesaplanmakta, deneysel çalışmalarda ise genellikle akış uzunlukları, kalıplanan parçanın minimum eğilmesi ve çarpılması incelenmektedir. Literatür çalışmaları ayrıntılı olarak incelendiğinde enjeksiyon kalıplama tekniklerindeki problemlerin ayrı ayrı ele alındığı ve kalıplanan plastik ürün maliyetinin hesaplanmasıyla ilgili çalışmalarda eksiklik olduğu gözlemlenmiştir.

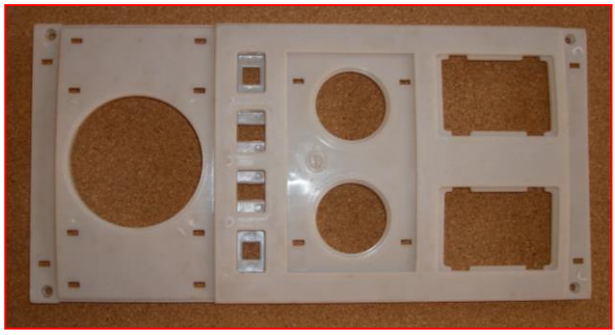
3.1. Deneysel ve MoldFlow Analizinde Enjeksiyon Sürelerinin Karşılaştırılması

Çalışmada hoparlör-lamba-ikaz düğme yuvası için MoldFlow'dan elde edilen değerler ile deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Çalışmada Hoparlör, Lamba ve İkaz Düğme Yuvası elemanı örnek olarak alınmıştır.

Enjeksiyon parametrelerinin hesabında kullanılan hoparlör, lamba ve ikaz düğme yuvası elemanı kalıbı Şekil 6'da, plastik enjeksiyon kalıbından elde edilen Hoparlör, lamba ve ikaz düğme numunesi ise Şekli 7'de verilmiştir.



Şekil 6. Hoparlör, lamba ve ikaz düğme yuvası kalıbının katı modeli



Şekil 7. Hoparlör, lamba ve ikaz düğme numunesinin fotoğrafı

Plastik enjeksiyon kalıplarıyla üretilen plastik ürünlerin Moldflow analizinden ve deneysel çalışmalardan elde edilen enjeksiyon süreleri karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalarda ¾ inch plastik dişli dirsek ve hoparlör-lamba-ikaz düğme yuvası örnekleri alınmıştır. Ancak karşılaştırmalar için hoparlör-lamba-ikaz düğme yuvası elemanı seçilmiştir. Her iki programdaki çalışmalardan hesaplanan enjeksiyon zamanları arasındaki fark %'lik olarak irdelenmiştir.

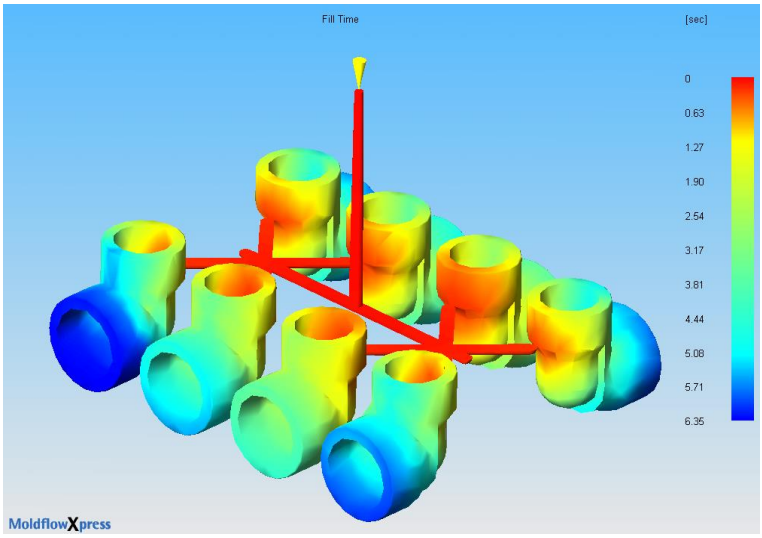
3.2. Plastik Dişli Dirsek Elemanı İçin Enjeksiyon Sürelerinin Değişimi

Farklı plastik ergime ve kalıp sıcaklıkları için ¾ inch plastik dişli dirsek elemanının enjeksiyon zamanları değişimi incelenmiştir. YYPE plastik malzeme enjeksiyon kalıplama yöntemi ile kalıplanırken plastik erime sıcaklığının 180-240 °C, kalıp sıcaklığının 20-60 °C olması önerilmektedir. Tablo 2'de MoldFlow analizinin farklı sıcaklıklardaki enjeksiyon zamanları değişimleri verilmiştir.

Tablo 2. ¾ inch plastik dişli dirsek elemanı için MoldFlow analizinden ve paket programdan bulunan enjeksiyon süreleri

Ergimiş plastik sıcaklığı (°C)	Kalıp sıcaklığı (°C)	MoldFlow'dan hesaplanan enjeksiyon süreleri (sn)
180	20	7,17
190		6,7
200		6,16
210		5,87
220		5,43
230		5,12
240		4,91
180	40	7,99
190		7,38
200		6,9
210		6,35
220		5,97
230		5,67
240		5,34
180	60	9,02
190		8,35
200		7,63
210		7,12
220		6,58
230		6,17
240		5,76

Plastik ¾ inch dişli dirsek elemanının kalıplama parametrelerine bağlı olarak MoldFlow analizinden elde edilen enjeksiyon süreleri analiz sonuçları Şekil 8'de gösterilmiştir.



Şekil 8. ¾ inch plastik dişli dirsek elemanının MoldFlow analizi sonucu bulunan enjeksiyon süreleri

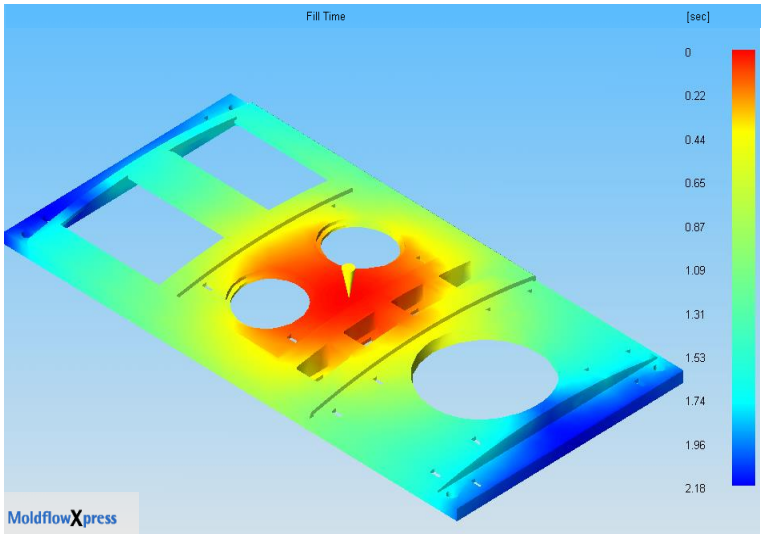
MoldFlow analizinden bulunan ortalama enjeksiyon süresi 6,66 sn iken deneysel çalışma sonucu elde edilen enjeksiyon süresi 5,06 sn olarak tespit edilmiştir. Bu sayısal verilere bağlı olarak deney çalışmalarından elde edilen ortalama enjeksiyon süreleri arasındaki fark yaklaşık olarak % 31 kadardır.

Çalışmada, ergimiş plastik sıcaklığı arttıkça enjeksiyon süresinin düştüğü, kalıp sıcaklığı arttıkça enjeksiyon süresinin arttığı görülmüştür.

3.3. Hoparlör, Lamba-İkaz Düğme Yuvası Elemanı İçin Enjeksiyon Sürelerinin Değişimi

Plastik parçalar enjeksiyon makinesi ile kalıplanırken belirli bir işlemlere tabii tutulurlar. Bunlar enjeksiyon süresi, soğutma zamanı, ütüleme zamanı, mengene açma-kapama zamanı olarak sınıflandırılmaktadır. Plastik ürünlerin üretiminde en büyük dezavantajlar çekme payıdır. Bu dezavantajlara etki eden birçok faktör vardır. Bu faktörler, birincisi enjeksiyon makinesi, ikincisi üretimi yapılan parçanın geometrik şekli, üçüncüsü ise üretimi yapılacak plastik malzemenin özellikleridir. ABS plastik malzemeden üretilen hoparlör, lamba ve ikaz yuvası elemanının 540 bar enjeksiyon basıncı, 230 °C ergimiş plastik sıcaklığı ve 60 °C kalıp

sıcaklığındaki MoldFlow analizinden bulunan enjeksiyon süreleri Şekil 9'da gösterilmiştir.



Şekil 9. Hoparlör, lamba ve ikaz düğme yuvası elemanının MoldFlow analizi sonucu bulunan enjeksiyon süreleri

Çalışmalarda da kalıp sıcaklığı sabit tutulduğu zaman plastiğin erime sıcaklığı arttıkça enjeksiyon süresinin daha kısa olduğu görülmektedir [37]. Ancak, plastiğin erime sıcaklığı sabit tutulduğu zaman kalıp sıcaklığı arttıkça enjeksiyon süresi artmaktadır. Buda, sıcak kalıbın erimiş plastik malzemenin akma viskozitesini düşürmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Kalıp malzemesinin sıcaklığı minimum tutulup ergimiş plastik malzemenin sıcaklığı maksimum alındığında ergimiş plastik malzeme, kalıp boşluklarını en kısa sürede doldurmaktadır. Bu işlemin tam tersi ise enjeksiyon işleminin uzamasına neden olmaktadır.

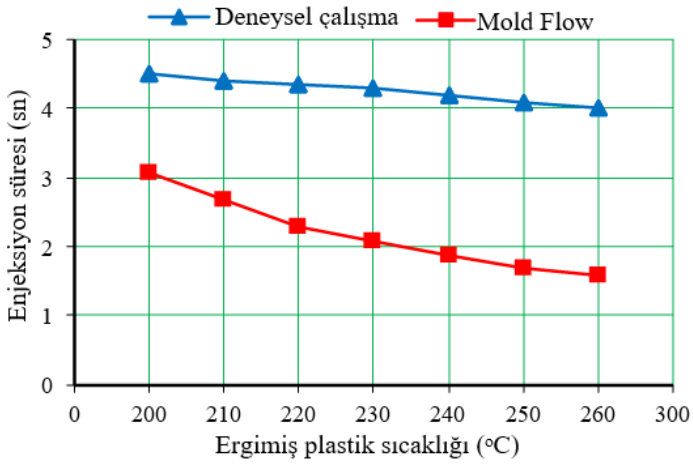
Deneysel çalışmada, ABS malzemeden elde edilen numunenin optimum ölçü tamlığı sağlandığı zaman enjeksiyon makinesindeki değerler; enjeksiyon basıncı 540 bar, plastiğin erime sıcaklığı 230 ˚C, kalıp sıcaklığı 40 ˚C ve enjeksiyon süresi 4 sn olarak okunmuştur. Tablo 3'de enjeksiyon basıncı 540 bar için hoparlör, lamba ve ikaz düğme yuvası elemanı için deneysel çalışmadan ve MoldFlow analizinden hesaplanan enjeksiyon süreleri verilmiştir.

Tablo 3. Enjeksiyon basıncı 540 bar için hoparlör, lamba ikaz düğme yuvası elemanı için deneysel çalışmadan ve MoldFlow analizinden hesaplanan enjeksiyon süreleri

Ergimiş plastik sıcaklığı (ºC)	**Kalıp sıcaklığı (˚C)**	**MoldFlow'dan bulunan** enjeksiyon süreleri (sn)	**Gerçek** enjeksiyon süreleri (sn)
200	40	3,08	4,5
210		2,67	4,5
220		2,29	4,2
230		2,08	4
240		1,88	3,8
250		1,68	3,8
260		1,58	3,7
200	60	3,4	4,7
210		2,99	4,5
220		2,59	4,2
230		2,18	4
240		2,08	4
250		1,88	3,8
260		1,68	3,9
200	80	3,88	5
210		3,38	4,8
220		2,88	4,6
230		2,58	4,4
240		2,28	4,2
250		2,08	4
260		1,89	4

4. Sonuçlar ve Tartışmalar

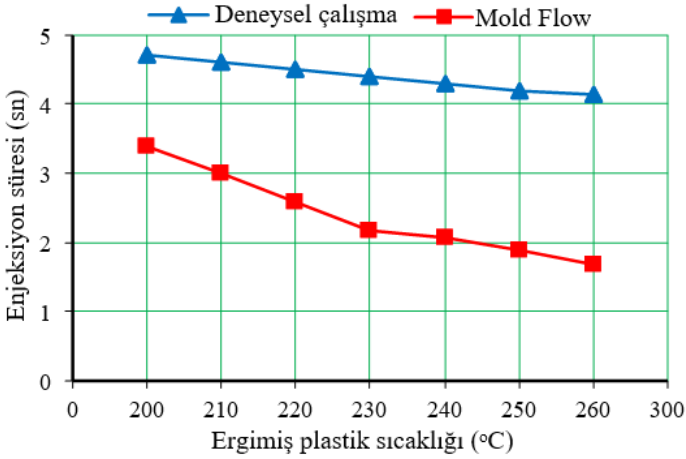
Enjeksiyon kalıplama tekniklerinde, plastik malzemelerin kimyasal özelliklerinden dolayı her plastik malzeme için kalıp ve erimiş plastik malzeme sıcaklıklarının belirli değerlerde olması gerekmektedir. ABS plastik malzeme için önerilen kalıp sıcaklıkları 40 ˚C-80 ˚C arasında, ergimiş plastik malzeme sıcaklıkları ise 200 ˚C-260 ˚C arasında olması gerekmektedir. Bu faktörler göz önünde bulundurularak ABS plastik malzemeden imalatı yapılan hoparlör, lamba ve ikaz düğme yuvası elemanının deneysel çalışmasından ve MoldFlow analizinden farklı sıcaklıklardaki enjeksiyon zamanları analiz edilmiştir. Kalıp sıcaklığı 40 ˚C'de sabit tutulan hoparlör, lamba ve ikaz düğme yuvası elemanının farklı ergimiş plastik sıcaklıklarındaki çalışmalardan elde edilen enjeksiyon zamanlarının grafiği Şekil 10'da verilmiştir.



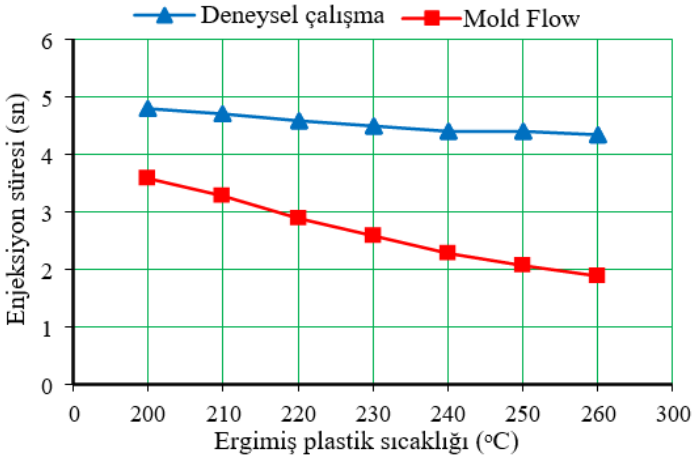
Şekil 10. 40 °C kalıp sıcaklığı için hoparlör, lamba ve ikaz düğme yuvası elemanında ergimiş plastik sıcaklığına bağlı olarak enjeksiyon sürelerinin değişimi

Grafikte kalıp sıcaklığının 40 ˚C, ergimiş plastik sıcaklığının 200 ˚C'de olması durumda deneysel çalışması yapılan hoparlör, lamba ve ikaz düğme yuvası elemanının enjeksiyon süresi 4.5 sn'de gerçekleşirken ergimiş plastik sıcaklığı 260 ˚C'ye çıkartıldığında enjeksiyon süresi 4 sn'de gerçekleşmiştir. Aynı parametreler için MoldFlow analizinden bulunan enjeksiyon sürelerini ise sırasıyla 3.08 sn ve 1.58 sn olarak elde edilmiştir. Uygulamadaki enjeksiyon süresi ile MoldFlow analizinden elde edilen enjeksiyon sürelerinin farklı olduğu görülmüştür. Uygulama sonucu elde edilen enjeksiyon süresi ile MoldFlow analizi sonucu çıkan hata yaklaşık %82.4 olarak elde edilmiştir.

Kalıp sıcaklığının 60 ˚C ve 80 ˚C olması durumunda çalışmalardan elde edilen enjeksiyon sürelerinin değişimi sırasıyla Şekil 11 ve Şekil 12'de gösterilmiştir.



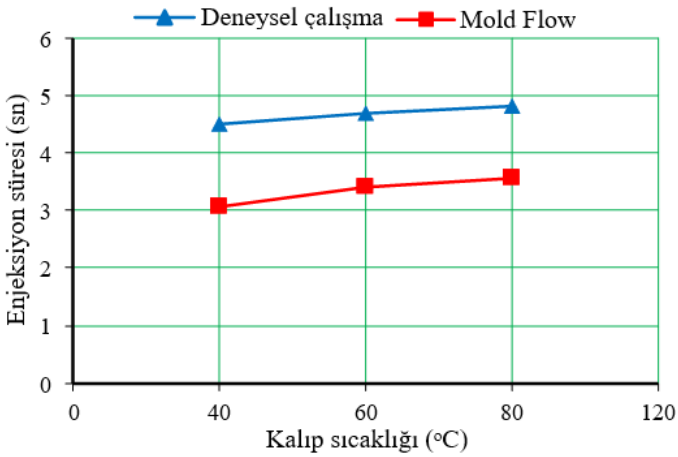
Şekil 10. 60 °C kalıp sıcaklığı için hoparlör, lamba ve ikaz düğme yuvası elemanında ergimiş plastik sıcaklığına bağlı olarak enjeksiyon sürelerinin değişimi.



Şekil 11. 80 °C kalıp sıcaklığı için hoparlör, lamba ve ikaz düğme yuvası elemanında ergimiş plastik sıcaklığına bağlı olarak enjeksiyon sürelerinin değişimi

Grafiklerde, ergimiş plastik sıcaklığının artmasıyla enjeksiyon sürelerinin düştüğü görülmüştür. Kalıp sıcaklığı arttıkça gerçek uygulamadaki enjeksiyon süresi ile MoldFlow'daki ortalama hata %67'ye düşmüştür.

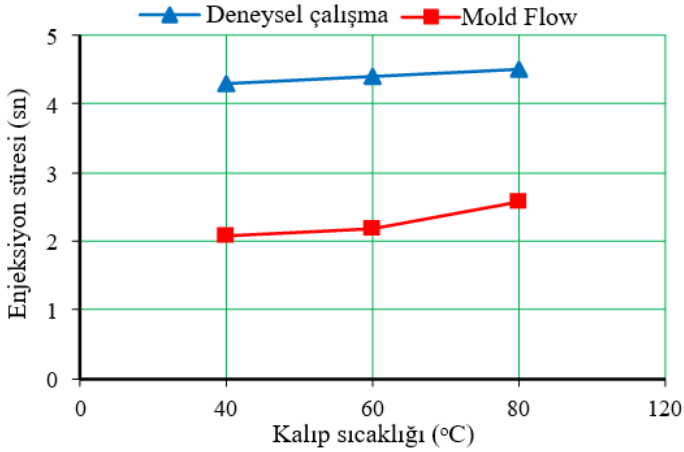
Kalıp sıcaklığının artmasıyla enjeksiyon sürelerinin değişimini görebilmek için ise Şekil 13, Şekil 14 ve Şekil 15'de sırasıyla 200 °C, 230 °C ve 260 °C ergimiş plastik sıcaklığı için deneysel ve MoldFlow analizinden hesaplanan enjeksiyon sürelerinin değişimleri ayrıntılı olarak gösterilmiştir.



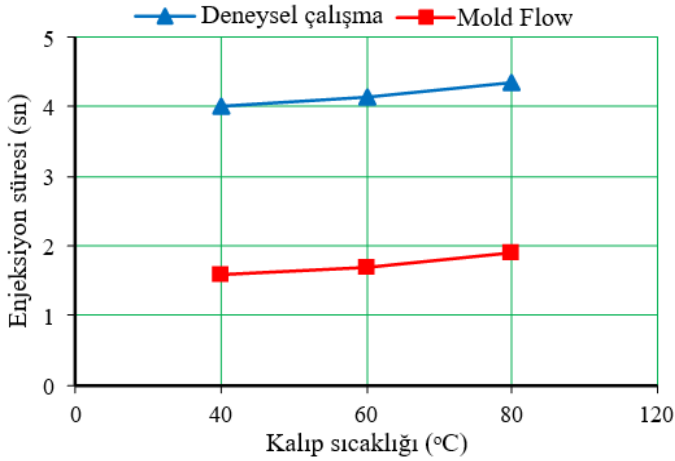
Şekil 13. 200 °C ergimiş plastik sıcaklığı için hoparlör, lamba ve ikaz düğme yuvası elemanında kalıp sıcaklığına bağlı olarak enjeksiyon sürelerinin değişimi

Ergimiş plastik sıcaklığı 200 °C'de sabit tutulduğunda, MoldFlow analizinden 40 °C, 60 °C ve 80 °C kalıp sıcaklıkları için enjeksiyon zamanları sırasıyla 3.08 sn, 3.4 sn ve 3.58 sn olarak elde edilmiştir. Deneysel çalışmada ise enjeksiyon zamanları sırasıyla 4.5 sn, 4.7 sn ve 4.8 sn olarak elde edilmiştir. Kalıp sıcaklığının 20 °C olması durumunda MoldFlow analizi ile deneysel çalışma arasında %46.10 kadar fark ortaya çıkmıştır. Kalıp sıcaklığının 80 °C'ye çıkmasıyla bu fark MoldFlow ile deneysel çalışma arasında %34.08 olarak bulunmuştur.

Ergimiş plastik sıcaklığı 230 °C'ye çıkartıldığında MoldFlow'dan elde edilen enjeksiyon süresi ile deneysel çalışmadan elde edilen enjeksiyon zamanları arasındaki hata düşmüştür. MoldFlow analizinden elde edilen hata miktarı artmıştır. Ergimiş plastik sıcaklığı maksimum seviyeye çıkartıldığında ise deneysel çalışma ile MoldFlow'dan elde edilen enjeksiyon süreleri biri birlerine yakın sonuçlar vermiştir.



Şekil 14. 230 °C ergimiş plastik sıcaklığı için hoparlör, lamba ve ikaz düğme yuvası elemanında kalıp sıcaklığına bağlı olarak enjeksiyon sürelerinin değişimi



Şekil 15. 260 °C ergimiş plastik sıcaklığı için hoparlör, lamba ve ikaz düğme yuvası elemanında kalıp sıcaklığına bağlı olarak enjeksiyon sürelerinin değişimi

Ergimiş plastik sıcaklığı 260 °C'de sabit tutulduğunda, MoldFlow analizinden 40 °C, 60 °C ve 80 °C kalıp sıcaklıkları için enjeksiyon zamanları sırasıyla 1.58 sn, 1.68 sn ve 1.89 sn olarak elde edilmiştir. Deneysel çalışmada ise enjeksiyon süreleri sırasıyla 4 sn, 4.15 sn ve 4.35 sn olarak elde edilmiştir. Kalıp sıcaklığının 40 °C olması durumunda MoldFlow analizi

ile deneysel çalışma arasında %153 kadar fark ortaya çıkmıştır. Kalıp sıcaklığının 80 °C'ye çıkmasıyla bu fark MoldFlow ile deneysel çalışma arasında %130 olarak bulunmuştur.

Kalıp sıcaklıkları 40 ˚C, 60 ˚C ve 80 ˚C olarak uygulandığında elde edilen ortalama enjeksiyon süreleri gerçek uygulamadan hesaplanan enjeksiyon süresi 4.42 sn ve MoldFlow analizinden bulunan ortalama enjeksiyon süresi ise 2.54 sn olmaktadır. Ancak, gerçek uygulamada ABS plastik malzemeden elde edilen hoparlör, lamba ve ikaz düğme yuvası elemanı optimum ölçü tamlığı sağlandığı zaman enjeksiyon makinesindeki değerleri; enjeksiyon basıncı 600 bar, plastiğin erime sıcaklığı 200 ˚C, kalıp sıcaklığı 50 ˚C ve enjeksiyon süresi 4,7 sn olarak okunmuştur.

5. Genel Sonuçlar

Bu çalışmada, hoparlör, lamba ve ikaz düğme yuvasının enjeksiyon süresinin bulunması için deneysel çalışmadan ve MoldFlow analizinden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Yapılan bu çalışmada kalıplanan elemanın hacimsel çekme miktarı, enjeksiyon ve soğutma zamanları deneysel ve teorik irdelenmiştir.

Enjeksiyon ve soğutma sürelerini etkileyen şeklin geometrik özellikleri, sıcaklık değişimi, basınç faktörleri gibi çok sayıda parametre vardır. Grafiklerde bu faktörlere bağlı olarak enjeksiyon sürelerinin değiştiği görülmektedir.

Plastik enjeksiyon kalıplama teknikleri için gerekli olan önemli sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

1-Plastik enjeksiyon kalıplarının tasarımı yapılırken üretilecek numunenin geometrik özelliklerine (minimum çekme miktarı için kalıp boşluk ölçülerinin çekme miktarınca büyük yapılması, maça sistemlerinin kullanılıp kullanılmaması, kalıp açılma çizgisinin ayarlanması), kalıbın kullanılacağı enjeksiyon makinesine (rasgele hazırlanmış kalıp enjeksiyon makinesinde kullanılmayabilir), plastik ürünün kalıplanma sayısına (uygun kalıp malzeme seçilmesi) dikkat edilmelidir.

2-Ergimiş plastik sıcaklığının artması enjeksiyon sürelerinin azalmasına, kalıp sıcaklığının artması ise enjeksiyon süresinin uzamasına neden olmuştur.

3-Ergimiş plastik sıcaklığının ve kalıp sıcaklığının artması soğutma süresinin uzamasına neden olmuştur.

4-Ergimiş plastik sıcaklığının artması kalıplanan üründe çekme miktarının artmasına, kalıp sıcaklığının ve enjeksiyon süresinin artması çekme miktarının azalmasına neden olmuştur.

KAYNAKLAR

[1] **Ergüney, S., Karataş, Ç. ve Sarıtaş, S.,** 2005. Ticari plastiklerin kalıpta akış boylarının incelenmesi, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Dergisi, Cilt 20, No 3, 297-303.

[2] **Çakır, Y., Özdemir, A. ve Güldaş, A.,** 2001. Plastik ürünlerde çekme miktarına etki eden enjeksiyon parametrelerinin incelenmesi, Teknoloji, sayı 1–2, 19–29.

[3] **Güldaş, A., Uluer, O., Özdemir, A.,** 2005. Enjeksiyon kalıplarındaki akışın analizi, ergimiş plastic akışının matematiksel modellenmesi için temel denklemlerin türetilmesi, Gazi üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, **18(4)**: 707–721.

[4] **Oktem, H., Erzurumlu, T., Uzman, I.,** 2005. Application of taguchi optimization technique in determining plastic injection molding process parameters for a thin-shell part, Materials and design.

[5]. **Ünal ,E., Taşdemir, V.,** 2018, Helisel Dişlilerde Dişli Devir Sayısının Temas Gerilmesi Üzerine Etkisinin Araştırılması, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 6 (3), 383 – 389.

[6]. **Ünal, E., Özek, C.,** 2017, A study on the wall thickness in the angular deep drawing process, Materials Testing, 59, 2

[7] **Karaağaç, R.,** 2001. Enjeksiyon kalıbında basılan ürünlerde kaynak hattının deneysel olarak incelenmesi, G. Ü., Yüksek lisans tezi.

[8] **Uluer, O.,** 2002. Plastik enjeksiyonla kalıplamada polimer ergiyigin kalıp boşluğuna dolumu sırasında akış oluşumunun deneysel olarak incelenmesi, G. Ü., Yüksek lisans tezi.

[9] **Ayar, Ç.,** 2002. Enjeksiyon kalıplarında üretim analizinin bilgisayar ortamında örnek bir parça için simülasyonu, G. Ü., Yüksek lisans tezi.

[10] **Can, H.,** 2004. Ön gerilmeli plastik dişli çark tasarımı, G. Ü., Doktora tezi.

[11] **Sadeghi, B.H.M.,** 2000. A BP- neural network predictor model for plastic injection molding process, Journal of materials processing technology, **103**, 411-416.

[12]. **Ünal, E.,** 2018. The Effect of Different Tread Profiles on Pullout Strength of Glass Fiber Reinforced Polymer Composite Materials, Cumhuriyet Sci. J., Vol.39, 2550-2556

[13] **Ferreira, J.C, Mateus, A.,** 2003. Studies of rapid soft tooling with conformal cooling channels for plastic injection molding, Journal of material processing technology, **142**, 508-516.

[14] **Acar, T.,** 2002. Plastik enjeksiyon kalıpları için bilgisayar destekli soğutma sistemi tasarımı, G. Ü., Yüksek lisans tezi.

[15] **Karaağaç, İ., Özdemir, A.,** 2005. Plastik enjeksiyon kalıplarında klasik maliyet hesabına algoritmik bir yaklaşım, G.Ü Fen Bilimleri Dergisi 18(4): 657-669.

[16] **Shelesh-Nezhand, K., Siores, E.,** 1997. An intelligent system for plastic injection molding process design, Journal of Materials Processing technology, 63, 458-462.

[17] **Özçelik, B., Erzurumlu, T.,** 2006. Comparison of the warpage optimization in the plastic injection molding uses ANOVA, neural network model and genetic algorithm, Journal of materials processing technology, 171, 437-445.

[18]. **Ünal, E., Karaca, F.,** 2022. Effect of turnıng parameters of AISI316 staınless steel On temperature and cuttıng forces with Fınıte element model, Thermal Science, , Vol. 26, 1, 61-S66

[19] **Tang, S.H., Kong, Y.M., Sapuan, S.M., Samin, R., Sulaiman, S.,** 2006. Design and thermal analysis of plastic injection mould, Journal of materials processing technology 171, 259-267.

[20] **Kahraman, E.,** Sıcak yolluk sistemleri ve etkileri, G. Ü. Makine bölümü.

[21] **Kovacs, J.G., Bercsey, T.,** 2005. Influence Of mold properties on the quality of injection molded parts, Periodica polytechnica ser. Mech. Eng. Vol. 49, no. 2, pp 115-122.

[22] **Chen, X., Lam, Y.C., Li, D.Q.,** 2000. Analysis of thermal residual stress in plastic injection molding, Journal of materials processing technology**, 101,** 275-280.

[23] **Shiou, F.J., Chen, C.H.,** 2003. Free from surface finish of plastic injection mold by wing ball-burnishing process, Journal of materials processing technology, 140, 248-254.

[24] **Lau, H.C.W., Wong, T.T., Pun, K.F.,** 1999. Neural-fuzzy modeling of plastic injection molding machine for intelligent control, Expert system with applications, 17, 33-43.

[25] **Güldaş, A., Uluer, O., Özdemir, A.,** 2006, The determination of viscosity and density variations of molten plastics, Teknoloji.

[26] **Kurtaran, H., Özçelik, B., Erzurumlu, T.,** 2005. Warpage optimization of a bus ceiling lamp base using neural network model and genetic algorithm, Journal of materials processing technology, **169**, 314-319.

[27] **Li, C.L., Li, C.G., Mok, A.C.K.,** 2005. Automatic layout design of plastic injection mould cooling system, Computer-aided design, **37**, 645-662.

[28] **Qiao, H.,** 2006. A systematic computer-aided approach to cooling system optimal design in plastic injection molding, International journal of mechanical sciences, **48**, 430-439.

[29] **Seaw, L.W., Lam, Y.C.,** 1997. Optimizing flow plastic injection molding, Journal of materials processing technology, 72, 333-341.

[30] **Kurt, A.B., James, M.C., Kos, I.,** Design for Injection Molding: Balancing Mechanical Requirements, Manufacturing Costs, and Material Selection.

[31] **Liparoti, S., Sorrentino, A., Titomanlio, G.;** 2019, Temperature and pressure evolution in fast heat cycle injection molding, Materıals And Manufacturıng Processes, Vol. 34, No. 4, 422–430.

[32] **Aminabadi, S., S., Tabatabai, P., Steiner, A.,** 2022, Industry 4.0 In-Line AI Quality Control of Plastic Injection Molded Parts, Polymers, 14, 3551. https://doi.org/10.3390/polym14173551.

[33] Ardestani, A., M., Azamirad. G., Shokrollahi, Y., Calaon, M., 2023, Application of Machine Learning for Prediction and Process Optimization-Case Study of Blush Defect in Plastic Injection Molding, Appl. Sci. 13, 2617. https://doi.org/10.3390/app13042617

[34] **Atılgan, R.F., Demirezen, H.,** Plastikler, Kocaeli Üniversitesi, Meslek Yüksek Okulu, Makine Bölümü, Malzeme teknolojisi.

[35] **M.E.B,** 1984. Hacim kalıpçılığı, Milli eğitim basımevi, İstanbul.

[36] Plastik enjeksiyon, www.ansiklopedi.gen.tr/index.php/ Plastik enjeksiyon.

[37] Kalıpçılıkta malzeme seçimi, www.gencbilim.com, gencbilim-maden-99.



Toplu Ulaşımda Sürdürülebilir Ücret Toplama Sistemleri

Metin Çancı[1] & Çiğdem Avcı Karataş[2]

[1] Yalova Üniversitesi, İktisadi ve İlimler Fakültesi, Uluslararası Ticaret ve Finansman Bölümü, ORCID: 0000-0002-2152-0975
[2] Yalova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Ulaştırma Mühendisliği Bölümü, ORCID: 0000-0002-6383-1376

1. GİRİŞ

Ücret toplama süreçlerinin sürdürülebilir olabilmesi ve etkin bir şekilde yönetilmesi, sistemin uzun vadeli başarılarını güvence altına alması gerekir. Ücret toplama süreçlerinin sürdürülebilir ve etkin bir şekilde yönetilmesi, uzun vadeli başarıların güvence altına alınması açısından önemlidir. Bu süreçlerde güvenli, verimli ve kullanıcı dostu ödeme sistemlerinin kurulması, nakit akışının düzenli tutulması ve maliyetlerin optimize edilmesi gibi adımlar gereklidir (Keote ve diğ., 2024; Hatipoğlu, 2017; Isern-Deyà ve diğ., 2012; Joshi ve diğ., 2023). Finansal sürdürülebilirlik, ücret toplama sürecinde kredi kartı, banka kartları ve dijital cüzdanlar gibi şeffaf, güvenilir ödeme yöntemleriyle yapılması ücret toplama güvenirliğini artırırken, diğer yandan yolcu bilgilerin de güvenliğini sağlayacaktır (Tirachini ve Hensher, 2011; Jose ve diğ., 2020). Banka kartları, akıllı telefonlar, dijital cüzdanlar ve biyometrik sistemler gibi dijital ödeme yöntemlerinin yaygınlaşması kullanıcıların daha hızlı ve daha güvenli ödeme yapmalarına olanak tanımakta, verimlilik ve kaynak yönetiminin sürdürülebilir hale gelmesini sağlamaktadır (Bieler ve diğ., 2022; Gyger ve Desjeux, 2001; Witvoet ve diğ., 2024). Toplu ulaşım ücret gelirleri sistemin sürdürülebilirliğinde önemli bir kaynaktır. Bu kaynağın yönetilebilmesinde nakit akışının düzenli, sürekli olabilmesini sağlayabilecek iş modelleri de geliştirilmelidir (Svečko ve diğ., 2010; Faroqi ve diğ., 2018; Witvoet ve diğ., 2024). Bu tür sistemlerin kurulabilmesinde büyük verileri işleyebilecek teknolojik altyapı, sistemin toplumsal ve çevresel beklentileri karşılayabilecek şekilde tasarlanmış olması gerekir (Keote ve diğ., 2024; Bieler ve diğ., 2022). Teknoloji, ücret toplama sistemlerin hızlı ödeme, gelir yönetimi ve veri analizi gibi avantajlarını da beraberinde getirmektedir (Isern-Deyà ve diğ., 2012; Hatipoğlu, 2017; Svečko ve diğ., 2010). Miorandi ve diğ. (2012) ile Singh ve diğ. (2013) tarafından yapılan çalışmalarda, büyük veri analizinin toplu taşımada operasyonel verimliliği artırmak ve yolcu hareketliliğini anlamak için temel bir araç olduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle, otomatik ücret toplama sistemlerinden (AFC) (automatic fare collection) elde edilen veri setleri, yolcu talebini daha doğru tahmin etmeye yardımcı olmaktadır. Diğer yandan mesafeye veya kullandıkları hizmete göre otomatik ücret toplama yöntemlerinin daha yaygın hale gelmesi adil ücretlendirmenin altyapısının oluşturulmasına imkân tanıyabilmektedir (Svečko ve diğ., 2010; Utsunomiya ve diğ., 2006). Dijitalleşme ve otomasyon ile büyük veri ve yapay zekâ, kullanıcı davranışlarını analiz etmek ve daha verimli ücret toplama stratejileri oluşturmak için kullanılabilir (Faroqi ve diğ., 2018; Bieler ve diğ., 2022). Talep yoğunluğuna bağlı dinamik fiyatlandırma sistemleri, kaynakların daha etkin kullanılmasını sağlayabilir (Tirachini ve Hensher, 2011;

Witvoet ve diğ., 2024). Toplu ulaşımda ücret toplama, finansal sürdürülebilirliğini sağlamanın yanı sıra yolcu hareketliliğini izlemek, yolcu deneyimini iyileştirmek ve güvenlik sağlamak için gerekli altyapıyı da sunabilmektedir (Jose ve diğ., 2020; Keote ve diğ., 2024; Witvoet eve diğ., 2024). Bu çalışma, toplu ulaşımda ücret toplama sisteminin sürdürülebilir tasarımı ve yönetimi hakkında kapsamlı bilgi ve stratejiler sunarak sürdürülebilir bir perspektifte sunmayı amaçlamaktadır. Toplu ulaşım yöneticileri, şehir içi toplu taşıma alanında politika yapıcılar, akademisyenler, öğrenciler, bilgi teknoloji hizmet sağlayıcı işletmeler ile çevre dostu ulaşım çözümlerine ilgi duyan sivil toplum kuruluşlarına rehberlik etmesi hedeflenmektedir.

2. ÜCRET TOPLAMA SİSTEMLERİNİN TEMEL BİLEŞENLERİ

Sürdürülebilir ücret toplama sistemleri genel olarak yolcuların biletlerini hızlı, kolay ve güvenli bir şekilde ödeyebilmesi, toplu taşıma araçlarına biniş sürelerinin kısalması, yolculuk verilerinin toplanması, analiz edilmesi ve kolaylaştırması, bu verilerle yolcu hareketliliğini değerlendirilmesi, toplu ulaşım hizmetlerinin optimize edilmesi ile yolcu gelir yönetimi rolleri bulunmaktadır. Glaister ve Lewis'e (1978) göre, toplu taşıma politikalarına entegre bir yaklaşım, fiyat esnekliklerinden faydalanılarak özel araç kullanımından toplu taşımaya yönelimi teşvik edebilmektedir. Bu tür politikalar, trafik sıkışıklığını azaltırken toplumsal refahı artıran bir ücret yapısının temelini oluşturabilmektedir. Lopez ve diğ. ile Bandyopadhyay ve diğ. (2011) çalışmaları, toplu taşımada kullanıcı odaklı politikaların ekonomik sürdürülebilirliği sağlamak için nasıl uygulanabileceğini göstermektedir. Örneğin, nesnelerin interneti (IoT) tabanlı sistemler aracılığıyla gerçek zamanlı veri kullanımı, daha adil ve esnek fiyatlandırma stratejilerinin geliştirilmesine olanak tanımaktadır.

Li ve diğ. (2011), otomatik ücret toplama sistemlerinden (AFC) elde edilen verilerle Yolcu Başlangıç-Bitiş Matrisi (OD) matrisi tahmini yapmanın, yoğun saatlerde otobüs planlamasının verimliliğini %85'e kadar artırabileceğini göstermişlerdir. Tellluri ve ve diğ. (2019) RFID (Radio-frequency identification) temelli otomatik otobüs biletleme sistemlerine yönelik çalışmaları, toplu ulaşımda manuel işlemlerin yerine geçen yenilikçi çözümler sunmaktadır. Bu sistemler, yolcu bilgilerini daha doğru bir şekilde kaydedip analiz ederek işletme verimliliğini artırmaktadır. RFID tabanlı sistemler ve şifreleme teknolojileri, ödeme verilerinin güvenli bir şekilde işlenmesini garanti etmektedir. Örneğin; Londra'nın akıllı ve temassız seyahat kartı olan Oyster kart sistemi, kullanıcı bilgilerini güvenli bir şekilde saklayan ve çift aşamalı doğrulama ile sahte bilet kullanımını

engelleyen bir yapıya sahiptir. Durgaprasad ve Rajesh (2016), otomatik ücret toplama sistemlerinin, sahte bilet kullanımını tespit ederek toplu taşıma gelir kayıplarını önlediğini göstermektedir. Zhao ve diğ. (2017) çalışmalarında, otomatik veri toplama sistemlerinin (AFC), güzergah verimliliğini %30 artırdığını ve yolcu yoğunluğunu daha doğru bir şekilde tahmin ettiğini göstermiştir. Güvenli, verimli ve müşteri dostu ödeme sistemlerinin entegrasyonu, toplu taşıma sistemlerinde hem kullanıcı memnuniyetini artırır hem de işletme maliyetlerini düşürmektedir. Bu sistemlerin geliştirilmesi, IoT, büyük veri analitiği ve RFID gibi yenilikçi teknolojilerle desteklenerek sürdürülebilir bir yapı oluşturulmasını mümkün kılmaktadır.

Ödeme araçları, ücret toplama cihazları, toplu ulaşım verilerinin işlenmesi ve gelir paylaşım mekanizmaları, sürdürülebilir ücret toplama sistemlerinin temel bileşenlerini oluşturmaktadır (Tirachini ve Hensher, 2011; Bieler ve diğ., 2022).

2.1. Ödeme Araçları

Kelagadi ve diğ. (2017), IoT tabanlı akıllı ulaşım sistemleri, seyahat mesafesine dayalı ücretlendirme için GPS destekli akıllı kart teknolojileri kullanarak hem işlem süresini kısalttığına hem de ödeme doğruluğunu artırdığına vurgu yapmaktadır. Zanella ve diğ. (2014) ile Al-Sakran (2015) çalışmalarında, IoT tabanlı teknolojilerin toplu ulaşım sistemlerinde ücret toplama süreçlerinin sürdürülebilirliği ve etkinliği açısından büyük fırsatlar sunduğu belirtilmiştir. Bu sistemler, gerçek zamanlı veri yönetimi ile daha hızlı ve doğru sonuçlar elde edilmesini sağlamaktadır. Manikandan ve diğ. (2015) çalışmaları, GPS ve RFID teknolojilerinin toplu taşıma sistemlerinde birlikte kullanımının, veri doğruluğunu artırarak biletleme süreçlerini optimize ettiğini göstermektedir.

Toplu ulaşım ücret bedelleri biletler, akıllı kartlar ve mobil ödeme araçları olmak üzere üç kategoride değerlendirilebilir.

Biletler

Geleneksel toplu ulaşım uygulamalarında görünen tipik ödeme biçimi kâğıt biletlerdir. Kâğıt bilet sürdürülebilir ücret toplama yaklaşımı olarak kabul görülmez. Kâğıt biletler teknolojik olarak verilerin işlenebilmesi için son yıllarda manyetik okuyuculu biletler halinde kullanımı yaygınlaşmıştır.

Akıllı Kartlar

Temassız ödeme kartları, yolcu tarafından kolayca okunan ve ödeme yapan sistemlerdir. Bu kartlar, yüklenebilir bakiyeye sahiptir ve toplu taşıma araçlarında kullanılabilir.

Mobil Ödeme Araçları

Akıllı telefonlar aracılığıyla yapılan ödemelerdir. Yolcular, akıllı telefonlarını QR kodlar, NFC, vb. gibi teknolojilerle temassız ödeme için kullanabilirler.

Biletler tek kullanımlar olabileceği gibi abonman kartları veya uzun süreli geçiş biletleri şeklinde de olabilir.

2.2. Bilet Satışları ve Makinaları

Akıllı biletler bilet satış gişelerinin yansıra bilet satış makinaları ya da internet üzerinden satışı yapılabilmektedir.

Bilet Satış Makinaları (Vending Machines)

Akıllı biletlerin veya geçiş kartlarının satışını gerçekleştiren makinelerdir. Yolcular bu makinalardan istedikleri zaman ve noktada bilet alabilirler.

2.3. Yolcu Bilet Bedellerinin Tahsilatları

Biletler, akıllı kartlar veya mobil ödemelerde yolcular toplu ulaşım araçlarına biniş ve inişlerde ücret tahsilatı için okutulduğu bilet doğrulama (Validatör) cihazlarıdır. Validatörler durak veya istasyonlardaki turnikelerde olabileceği gibi otobüslerde ise araca monte edilmiş halde de olabilir. En fazla 10 cm mesafeye kadar yaklaştırılan kartların içerisindeki bilgiler okunarak bilet geçerliliği sağlanmakta, yolculuk için yeterli kontör veya geçiş (biniş) hakkının olması durumunda geçişe izin verilmekte ve tahsilat sonrası yeni bakiye tekrar karta yazılmaktadır. Yapılan yolculuğa ait bazı bilgiler kartın içerisindeki hafızaya bazı bilgiler de karttan tahsilat yapan validatör cihazının içerisine belirlenen bilgisayar formatlarda yazılmaktadır. Veri işleme, veri değerlendirme farklı saklama alanlarında yedeklenerek kaydedilmekte ve kurulan sistemin haberleşme altyapısına bağlı olarak lokal ve merkezdeki ana veri depolama alanlarına aktarılmaktadır. Bilet doğrulama cihazları çevirim dışı olarak çalışmakta, banka kartlarında olduğu gibi işlem esnasında provizyon almaya ihtiyaç duymamaktadır. GPRS bağlantısı sayesinde gerektiğinde çevirim içi bağlantı kurabilmek imkânı da bulunmaktadır. Cihaz üzerindeki ekranlar ve LED'ler sayesinde görsel olarak sürücü ve yolcu bilgilendirilmekte, cihazın hoparlörü sayesinde de sesli uyarılar verilebilmektedir.

Son yıllarda bilet doğrulama cihazları, gelişen teknoloji ile birlikte veri işleme kapasiteleri ve bağlantı özellikleri açısından önemli ölçüde gelişmiş, sadece doğrulama işlevini değil, aynı zamanda gerçek zamanlı veri analizi ve sistem entegrasyonunu destekleyen bir yapıya dönüşmüştür (Zhu ve diğ., 2012). GPS ve

GPRS desteği sayesinde sadece bilet doğrulama cihazı olmaktan öte yol kılavuzu (navigation), araç ve filo takip sistemi, araç içindeki elektronik cihaz ve bilgilendirme monitörlerine kumanda eden ana bir kontrol ve kumanda sistemi gibi çalışabilmektedirler. Salim ve diğ. (2013) ve Zhu ve diğ.'nin (2012) araştırmaları, toplu taşımada GPS ve GPRS teknolojilerinin entegrasyonunun hem işlem hızını artırdığını hem de konum tabanlı ücretlendirme sistemlerinde doğruluğu sağladığını göstermektedir. Bu tür teknolojik yenilikler, kullanıcı memnuniyetini artırmak ve operasyonel hataları azaltmak için önemlidir. Bilet doğrulama cihazları belirlenen ücretlendirme politikasına bağlı olarak farklı modellerle tahsilat yapabilmektedir. Genellikle ücretlendirme yapıları işletmenin müşteri, finansal, operasyonel ve politik hedefleri doğrultusunda belirlenir. En yaygın kullanılan ücretlendirme modelleri sabit ve kademeli ücretlendirmelerdir.

2.4. Ücret Tahsilat ve Hakkediş Hesaplanmasında Rol Alan Birimler

Ücret toplamanın üçüncü önemli parçası ise elde edilen bilet gelirlerinin dağıtımıdır. Yolcu bilet gelirleri özellikle finansal sürdürülebilirlik yönüyle hayati derecede önem taşımaktadır. İdare toplanan gelirleri bankada bir havuz hesabına alır. Havuz hesabının yönetimi genellikle İdare tarafından yapılır. Ücret tahsilat ve hakkediş işlemlerinde teknoloji işletmeleri, bankalar ve idareler rol alan birimlerdir.

Teknoloji İşletmeleri

Teknoloji işletmeleri yolcu ücret toplama sisteminde teknolojik alt yapıyı kurulması ve işletilmesinden sorumludur. Yolcuların biniş/iniş verilerini toplayan yazılımlar. Bu veriler, taşıma kapasitesini optimize etmek, gelir analizleri yapmak ve yolcu davranışlarını incelemek için kullanılır. Ayrıca, Ücret toplama işlemlerini izleyen ve toplu taşıma hizmetlerinin finansal yönlerini yöneten yazılımlar, gelirlerin doğru şekilde kaydedilmesi ve raporlanması sağlanır.

Teknoloji işletmeleri toplu taşıma araçlarına biniş ve inişlerde biletin geçerliliği ve ödeme doğruluğunun denetlenmesini sağlayan sistemlerin kurulumu, işletilmesi, araç, yapılan kilometre ve taşınan yolcu sayıları gibi çeşitli verileri sağlamak ve hakkediş tutarlarının hesaplanması için gerekli alt yapıyı yönetmekle sorumludur. Bu gibi sorumluluklarının yanında bilet satış makinaları, gişeler, geçiş cihazları, yolcu bilgilendirme ekranları ve sistemlerinin kurulum, işletilmesi, bakım ve onarımın yapılması gibi teknoloji ve alt yapı faaliyetleri bulunmaktadır. Bu durumda gerekli yazılımlar, ekipman ve araçlar, bu ekipmanların araç ve garajlara konumlandırılması ve verilerin elektronik aktarımın sağlanması ve nihayetinde hak ediş verilerinin havuz hesabını yöneten idareye aktarılmasında nitelikli iş gücü ile teknoloji şirketlerinin sorumluluğundadır. Ayrıca bu şirketler bu

sistemin sürekli faal olabilmesi için gerekli bakım onarım, yenilenme ve güncellenme işlemlerin yapılabilmesinden de sorumludur. Yazılım ve servis altyapısına bağlı olarak (sistemin parametrik yapıda olması ve sürümleme özelliği sayesinde) geriye dönük hak edişlerin hesaplaması o tarihte geçerli olan kart- bilet -komisyon oranları üzerinden hesaplanabilmektedir.

İşletmeci firma ve hizmet veren tüm kuruluşlar veri tabanından elde edilen istatistiklerden de faydalanabilmektedir. Bu verilere bağlı olarak hizmet kalitesini artıcı planlamalar yapabilmekte, hat optimizasyonu ile hem yolcu memnuniyeti sağlanmakta hem de giderler optimize edilebilmektedir. Yazılım ve servis altyapısına bağlı olarak web servisleri aracılığıyla şirketlerin Kurumsal Kaynak Planlama (ERP) Programları ile entegrasyon sağlanabilmekte ve ERP'nin ilgili modülleri ile otomatik Hakkediş çıkarılıp imzaya hazır olarak dökümü yapılabilmektedir. Teknoloji işletmelerinin bu tür çalışmaları nedeniyle bilet gelirlerinden pay alır.

Bankalar

İnternet, bilet satış gişeleri, bilet satış makinaları veya kredi kartlarıyla yapılan ödemeler İdarenin banka havuz hesabında toplanır. İdare hesaplanan hakkedişlere göre taşıma operatörlerine, teknoloji desteği veren işletmelere ve İdare payı olarak kendisine ödeme emri verir.

İdare

İdare yetkili yerel yönetimlerdir. Oluşan gelirin paylaşımı elektronik ücret toplama sistemindeki paydaşlarının kararına ve İdare'lerin şartlarına göre şekillenmektedir. İdare, operatörlerle birlikte günlük yolcu taşıma sayılarının hatlara ve saatlere göre büyük farklılıklar gösterdiği yerlerde oluşan gelir, otobüs adedine göre paydaşlar arasında eşit bölünerek havuz sistemine göre dağıtılır. Parasal eşitliğin yanında operasyonel eşitliği sağlamak amacıyla araçlar mevcut hatlarda rotasyona tabi tutulmaktadır. İdare, rotasyon uygulamasının yapılamayacağı yerlerde (hatların şirketlere tahsis edilmiş olması) tur başına ücret tespit edilerek günlük yapılan tur adedine göre bir gelir hesaplayabilir. Bu modelde gelir mağduriyetini önlemek için "günlük km alt sınırı" tespit edilerek tatminkâr bir tur adedine ulaşamayan araç sahiplerine de makul bir tahakkukta bulunulmaktadır.

Kart kullanım verileri merkezde toplandıktan sonra yolcu sayısına bağlı olarak gelir hesabına gidilmektedir. Belediyeler Toplu Taşımacılıkta hat veya araç kiralama modeli ile çalışmaktadırlar. Paydaşlara yapılan ödemeler; Yapılan km bazında, Yapılan tur bazında, Taşınan yolcu sayısı bazında, İlaveten araç konforu ve müşteri memnuniyeti katsayısı ile, bu kriterlerden bir veya birkaçının karışık

olduğu modellerle belirlenmektedir., Bu yüzden araçlardan verilerin sık periyotlarda ve uzaktan alınabilmesi kritik önem taşımaktadır. Gelir akışını, yolcu sayısını ve yolcu bilet denetimlerinin yapılması, sistem performans ve kapasitesini izlenmesi, ücret toplama sistemlerinin etkinliğini ve gelirlerini analiz eden raporlanması, sistemin başarısının ölçülmesi ve geliştirme gibi yönetişim çalışmaları ile hat kira ücretleri nedeniyle idare bilet gelirlerinden pay alır.

2.5. Toplu Ulaşım Yolculuk Verilerinin Toplanması ve İşlenmesi

Elektronik ücret toplama sistemlerinde bilet oluşturma (formatlama, tanımlama, kişiselleştirme), bilete dolum (yükleme) ve bilet geçerleme süreçlerinde oluşan veriler farklı teknolojiler kullanılarak yerel ve merkezdeki veri depolama alanlarına aktarılmaktadır. Veri toplama ve aktarmada kullanılan metotlar ve teknolojiler çeşitli şekillerde olabilir. Bunlar; Ethernet hatlarıyla, WiFi, GPRS, IrDA vb. yöntemleriyle bilet gişeleri, bilet satış makinalarında ya da araç validatöründeki veriler depolama alanlarına aktarılır. Ethernet Hatlarıyla istasyon ve vapur iskelelerde bulunan) verilerin aktarılmasında kullanılır. IrDA yoluyla özellikle otobüslerin sefer sonrası garajlarda validatörlerdeki verilerin aktarılmasında kullanılır. Kullanım ve bakım zorlukları ve gelişen WiFi ve GPRS teknolojileri le birlikte günümüzde fazla tercih edilmemektedir. WiFi yöntemiyle belli saatlerde belli noktalara toplanan ulaşım araçlarından verinin daha düşük maliyetlerle veri depolama alanına aktarılmasında kullanılır. GPRS yöntemi ise, en çok tercih edilen teknoloji olup her araca konulan SIM kartlarla verilerin, GSM operatörleri altyapısı desteği ile belirlenen veri depolama alanlarına istenen periyotlarda aktarılmasında kullanılır. GPRS teknolojisi sayesinde toplu taşıma araçlarına uzaktan bağlanabilme, program, yeni tarife yükleyebilme ve müşteri hizmetleri desteği için anlık veri alabilme imkânı vardır.

Verilerin İşlenmesi

Bilet/akıllı kartın işlem gördüğü her cihazda yapılan işlemlere ait zaman, işlem, bilet/akıllı karttan okunan bilgiler ve bilete/akıllı karta belli prosesler sonunda yazılan bilgiler belirlenen şablona göre bir harita oluşturularak farklı şekillerde bilgisayar formatlarında yazılmakta ve saklanmaktadır. Bu verilerin lokal veya merkezdeki depolama alanlarına gelişi ile altyapıya bağlı olarak belli periyotlarda veya anlık veri işleme prosesi gerçekleşebilmektedir. Ücret toplama sisteminin tüm süreçlerinde belirli formatta üretilen veriler lokal veya merkezdeki servisler sayesinde ayrıştırılarak veri tabanına kaydedilmektedir.

Veri Değerlendirme

Veri tabanına kaydedilen veriler, servisler, özel yazılımlar, sorgulama araçları, veri madenciliği araçları ile filtrelenerek analiz edilebilmektedir. Toplu taşımacılıkta ücret toplama sisteminin her aşamasında oluşan veriler belirli periyotlarda belirlenen veri depolama alanlarına aktarılarak veri tabanlarına kaydedildikten sonra, sistemin sağlıklı işleyişi için analizlerin çıkarılması, müşteri hizmetleri desteği, kayıp/çalıntı durumunda yolcuya/işletmeye destek, kara listelerin yüklenmesi ve kontrolü, bilet ücret politikalarının analizi ve geliştirilmesi, ücret toplama / tahsilat modellerinin analizi ve geliştirilmesi, yolculuk alışkanlıklarının analizi, yolcu alışkanlıklarının analizi, sayısal istatistiklerin çıkarılması, parasal istatistiklerin çıkarılması, gelir paylaşımının sağlanması ve daha birçok katma değerli işlem için kullanılmaktadır.

İstatistikler ve Hesap Mutabakat İşlemleri

Özellikle sistem paydaşları arasındaki gelir paylaşımı için bu verilerin toplanıp işlenmesi, değerlendirilmesi, paydaşlarla yetkileri dâhilinde paylaşılarak şeffaf bir paylaşım sisteminin devamlılığı büyük önem arz etmektedir. Doğru verilerle ve istenilen anlarda gelir hesaplaması ve bunların paydaşlar tarafından da şeffaf bir şekilde izlenebilmesi sistemin devamlılığı için en önemli unsurdur. Farklı bilet tip ve uygulamalarının, ücret politikalarının ve farklı işletmecilerin yer aldığı modellerde veri değerlendirme ve gelir paylaşımı çok daha fazla önem kazanmaktadır. Sistemdeki verilerden sayısal (istatistiki) ve parasal verilerin çıkarılması teknoloji işletmelerinin yaptıkları en kritik işlemlerdir. Sayısal (istatistiki) raporlar sayesinde; Yolcu, İdare, Otobüs İşletmelerine açısından fayda sağlayacak kararlar çıkarılabilmektedir.

Veri tabanındaki verilerden biletle ilgili olarak; biletin tanımlanma ve oluşturulma zamanı (tarih ve saat), üretim zamanı (tarih ve saat), hangi tip ve türde bilet olduğu (Tam, İndirimli, Abonman, vb.), biletin geçerlilik tarih ve saati, biletin varsa abonman ve geçiş zamanı bitiş tarih ve saati,, bilete yapılan dolum miktarı (TL/kontör veya abonelik süresi, geçiş hakkı), biletin en son işlem yaptığı cihaz, biletin seri no.su, biletin en son geçiş yaptığı cihaz, biletin en son geçiş yaptığı ulaşım aracı (otobüs, tren, vb.), biletin en son geçiş yaptığı cihaz seri numarası, biletin en son geçiş yaptığı tarife, biletten düşen TL/Kontör veya azalan geçiş hakkı, bilet bakiyesi, dolum yapılan makine türü (POS, bilet satış makinaları), dolum yapan makine kodu, dolum yapılan tarih ve saat, dolum miktarı (her bilete ayrı ayrı ve toplam), geçiş yapılan cihaz seri numarası, geçiş yapılan tarih ve saat, geçiş yapılan cihazın bulunduğu ulaşım aracı (otobüs, tren, vb.), geçiş yapılan

otorite (Otobüs işletmesi, Vapur işletmesi, vb.), geçiş yapılan tarife, geçiş yapıldıktan sonra geçiş cihazına kaydedilen sayaçların yeni bakiyesi, geçiş yapan biletin türü, kategorisi, aktarmalar, indirimli geçişler, ücretsiz geçişler, serbest kart geçişleri, aynı bilet/kartla mükerrer geçişler, avans (ödünç) biletli binişler, bakiyesi yetersiz kart dokunuşları, tanımsız veya sisteme ait olmayan kart dokunuşları vb. birçok bilgi çıkarılabilmektedir. Bu tür istatistiki verilerle; yolcu memnuniyetini artırıcı faaliyetlerin planlanması, hat optimizasyonu, tarife ve bilet ücret ayarlamaları, aktarma ve yeni ücret politikalarının planlanması, ek sefer organizasyonu, hattan araç azaltma, yolcu profilinin ve bilet kullanım profilinin çıkarılması, yolculuk haritalarının çıkarılması, yolcuların toplu taşıma ağına dağılımının çıkarılması, yolcuların ulaşım araçlarına dağılımının çıkarılması, yolcuların hafta içi-hafta sonu bilet kullanım oranları, gün içi saatlere yolcu dağılımının çıkarılması ile bilirlikte mali hak ediş paylaşımlarının hesabı için de kullanılabilmektedir.

2.6. Hakkedişlerin Hesaplanması

Toplu ulaşım operatörleri, İdare, alt yapı ve teknoloji işletmeleri arasında yönetmelik gereği belirlenmiş hesaba göre dönemsel olarak hakkediş dağıtımı yapılır. Hesaplamada yolcu biniş sayıları, araçların yaptıkları kilometre gibi verilere dayalı olarak hakkediş gelirlerin dağıtımı standart, güvenlikli ve gerçek zamanlı olarak yapılması hedeflenir. Taşıma başarı kriterleri olarak; trafik ve sistem kurallarına, çalışma programına uyum, teknik yeterlilik, temizlik, yolcu memnuniyeti, otobüsler için durak ihlalleri, gibi koşullar dikkate alınır. Yapılan denetimlerde eksik veya kusur bulunması halinde performans çizelgesinde bulunan yaptırımlar uygulanır. Hak ediş ödemeleri taşıma operatörü işletmecisi çalışma programına göre sefer kilometresi ve veya taşınan yolcu sayılarına göre belirlenebilir. Bazı şehirlerde doğrudan yapmış olduğu kilometre olarak, bazılarında taşınan yolcu sayılarına göre ya da bu ikisinin belirli oranda toplam değerlerine göre taşımacıya ödeme yapılır.

Gelir paylaşımındaki oranlar şehirden şehre, anlaşma yapılan paydaşa göre değişebilmektedir. Bazı paylaşım modellerinde hizmet veren işletmeci kuruluşlara ve Merkez İdare'ye hakkedişleri biletlere yapılan dolum üzerinden bazı modellerde de yapılan geçiş miktarı üzerinden hesap yapılarak ödenmektedir. Farklı şehirler ve aynı şehirdeki farklı paydaşlar için farklı oranlarla gelir paylaşımın yapılmasına olanak sağlayan yazılım/servisler sayesinde her bir otobüs ayrı bir şirket olarak değerlendirilip hak edişi ayrı çıkarılabilmektedir. Taşımacıya ödemeler haftalık, aylık gibi dönemler dâhilinde yapılır. Metro, Tramvay, Vapur, Otobüs reklam gelirleri yerel otoriteyle yapılan anlaşma gereği bir kısmı veya tamamı ayrıca ödenir.

3. YOLCU BİLET TÜRLERİ

Yolcu biletleri kâğıt biletten elektronik biletlerin farklı versiyonlarına kadar çeşitli olabilir. Küçük ve orta ölçekli yerleşimler için karmaşık teknolojilere ve altyapılara fazla gereksinim duyulmaz, nakit, jeton veya kâğıt bilet uygulamaları yeterli iken, yolcu sayıları, işletmelerin yapıları, kademeli ücretlendirme gerektiren büyük şehirlerde yolcu bilet teknolojileri manyetik kart veya akıllı kartlara kadar değişik seçeneklerde olabilir.

3.1. Manyetik Şeritli Biletler

Manyetik şeritli kâğıt ve plastik maddelerden oluşup arkasında değeri ve kullanımıyla ilgili bilgilerin depolanabildiği biletlerdir. Bu ücret ödeme türü; okutulan kartın binilen araçta geçişe uygunluğunu denetleyen veya kartın içinde yüklü olan miktardan geçişe uygun miktarın düşmesini sağlayan elektronik okuyucuları içerir. Manyetik teknoloji sadece okunabilir (günlük kullanım gibi) veya okunup yazılabilir (kullanıldıkça içindeki miktar düşecek şekilde) olabilir. Kâğıt biletin birçok dezavantajını bertaraf eden manyetik biletler halen bazı şehirlerde özellikle tek geçiş bilet olarak kullanılmaktadır. Ücret toplama sistemlerinde manyetik şeritli bilet kullanımı 1960'lı yıllara kadar dayanır. İlk olarak raylı sistemlerde kullanılmıştır. Manyetik şeritli biletler kâğıt veya plastikten olabilmekte, duruma göre üzerlerinde baskı (kalan miktarın gösterildiği) yapılabilmektedir. Genellikle kâğıt manyetik şeritli biletler üzerine baskı yapılır. Manyetik şeritli biletlerin avantajlarının başında maliyetleri diğer elektronik sistemlere kıyasla daha uygundur. Herhangi bir bölgedeki ödeme sistemlerine kolaylıkla uyumlandırılabilir. Olumsuz yönlerini başında bilet doğrulamada bekleme süreleri akıllı kartlara kıyasla daha uzundur. Manyetik şeritlerin kopyalanma riskleri yüksektir. Ekipman bakım maliyetleri akıllı kart işleme ekipmanlarına kıyasla daha yüksektir. Destek sistemi olarak satış ağına ve elektronik ücret toplama sistemi altyapısına ihtiyaç vardır. Manyetik şeritli bilet okuyucularının maliyetleri, temassız akıllı kart okuyucularına kıyasla daha yüksektir (Manikandan ve diğ., 2015).

3.2. Akıllı Kartlar

Akıllı kartlar, manyetik kartlardaki manyetik şeritlere benzer şekilde bilgisayar çipleri taşırlar. Temassız akıllı kartlar bir terminal (okuyucu) aracılığıyla radyo dalgaları ile haberleşerek veriyi okuyan, değerlendiren, depolayan kartlardır. Standartlarında belirlendiği şekilde cebe (cüzdana sığacak) ebatlarda olup içerisine yerleştirilmiş olan devrelerle çalışır. Kart pasiftir, okuyucu karta erişir ve okuma/yazma işlemi yapar. Akıllı temassız kartların haberleşme standardı ISO/IEC 14443'tür. A ve B olmak üzere iki farklı tipi olan bu kartların standart-

larına alternatif olarak 50 mm'ye kadar okuma yapabilen ISO/IEC 15693 standardında kartlar da mevcuttur. Ancak bu kartlar toplu taşımacılıkta bilet sistemi olarak kullanımdan ziyade otoyol geçiş, otopark ücreti ödeme alanlarında tercih edilmektedir. Akıllı kart sistemlerinde yer alabilecek alt sistemler aşağıdaki gibi olabilmektedir: Akıllı kart okuyuculu ücret kutusu; Akıllı kartlar (Kâğıt veya Plastik); İstasyon Yazılımı/Donanımı; Garaj Yazılımı/Donanımı; Merkez Birim Yazılımı/Donanımı dır. Temassız akıllı kartlar, hafıza kartlar ve chip'li kartlar olmak üzere iki kategoriye ayrılmaktadır.

Bu kartlar okuyucuya dokundurulmak veya belirli bir mesafeye kadar yaklaştırılmak suretiyle okutulur. Farklı fonksiyonlarda da kullanılabilmektedirler (toplu taşıma sistemleri, park yerleri ödemeleri, alışveriş, üniversiteler gibi). Akıllı kartlar ayrıca farklı taşımacılık modları arasında ücret entegrasyonunu kolaylaştırabilmektedir. Temassız akıllı kartlar son yıllarda tüm dünya çapında ilgi görmüş ve toplu taşımacılık sistemleri işletmeleri tarafından en yaygın kullanılan ücret toplama aracı haline gelmiştir. Günümüzde toplu taşımacılık sistemleri, bankacılık hizmetleri, internet erişimi, mobil ticaret, üniversitelerin çeşitli kurumları gibi farklı birçok alanda akıllı kartlar kullanılmaktadır. Belli bir mesafeye kadar (max. 10 cm) kart okuyucusuna yaklaştırılması okuma ve yazma işlemlerinin gerçeklemesinde yeterli olduğundan (hands-free) kullanım özelliği vardır. Cüzdan veya çantadan çıkarmadan kullanım bu özelliğin en yaygın kullanım örneğidir. Akıllı temassız kartların toplu taşımacılıkta elektronik bilet olarak en bilinen uygulamaları Tayvan'da EasyCard, Hong Kong'ta Octopus Card, Güney Kore'de T-Money, Tokyo'da Pasmo Card, Londra'da Oyster Card, İstanbul'da İstanbulkart 'tır.

Temaslı akıllı kartlar ilk olarak Avrupa'da 1980 yılında ön ödemeli görüşme yapılmak üzere telefon kartları olarak kullanılmıştır. Mikro işlemcili çiplerin yer aldığı akıllı kartlar ise çok daha sonra ortaya çıkmıştır. Mikro işlemcili çipler sayesinde hem kartta hem de okuyucuda veri şifreleme mümkün olabilmiş; böylelikle akıllı kartların kullanım alanları (ticaret, banka, vs.) oldukça genişlemiştir. Bu kartlarda kart okuyucunun işlemi gerçekleştirme süresi saniyenin beşte biri kadardır. İlk çıkan kartlarda ek güvenlik gerektiğinde (örneğin bankalar tarafından) bu işlem daha uzun sürmekteyken, günümüzde oldukça hızlı mikroişlemciler sayesinde güvenlik işlemleri de oldukça kısa sürmektedir. Birçok uygulamada temaslı akıllı kartlara duyulan ihtiyaç ve taşımacılık hizmetlerinde ise temassız akıllı kartlara duyulan ihtiyaç ve bu ihtiyaçların tek bir kart tarafından giderilmesi arzusu temaslı ve temassız ara yüzleri birleştiren çift ara yüzlü yeni bir kart tipinin ortaya çıkmasına sebep olmuştur. Bu kart sayesinde bir alışveriş merkezinde alışveriş yaparken kartın pos cihazından geçirilerek okutulabildiği veya ATM'den

para çekilebildiği gibi, toplu taşımada temassız ara yüz sayesinde kart okuyucuna yakınlaştırılarak temassız geçiş sağlanabilecektir. Bu tür kartların avantajları; temassız akıllı kartlar için manyetik kartlara kıyasla daha hızlı işlem süreleri sağlar (böylelikle sürücü kontrollü sistemlerde biniş süreleri oldukça kısalabilmektedir.). Kartların cüzdan çıkarılmadan okutulabilmesi kullanıcıya zaman ve rahatlık avantajı sağlar. Yabancı cisimlerin bozabileceği bir yapıları olmadığından daha az bakım ihtiyacı, kopyalama ve sahtekârlığa karşı daha yüksek güvenilirlikleri vardır. Akıllı kart cihazlarının kompakt olmalarından dolayı büyük ölçüde kurulum esneklikleri vardır. Toplu ulaşım dışında ve birçok alanda kullanılabilir. Dezavantajları ise, satış ağı da içeren elektronik ücret toplama altyapısı gereksinimi bulunmaktadır. Akıllı kartların üretim maliyetleri manyetik şeritli kartlara kıyasla daha yüksektir.

3.3. Mobil Ödemeler

Birçok şehirde kâğıt biletten akıllı kart sistemlerine kadar tüm sistemlerin yanında bankaların çıkarmış olduğu banka kartları ile akıllı telefonlarla yapılan ödeme yapılabilme seçeneği de bulunmaktadır. Ancak banka kartları ile yapılan ödemeler, genellikle tek kullanımlı ve bilet entegrasyonu ile ilgili uygulamalar konusunda yeterli esnekliğin olmamasından dolayı çok cazip bulunmamaktadır. Mobil ödemeler özellikle şehir dışından gelen bir veya birkaç kez kullanıma yönelik kullanıcılara fayda sağlayabilir. Özel kurumlar ve toplu taşıma işletmeleri arasında koordinasyonda zorluklar oluşabilir. Bilet sistemleriyle tamamen entegre olmaması, çoklu aktarma imkânının bulunmaması, birim biniş ücretinin diğer ücret ödeme yöntemlerine kıyasla daha yüksek olması mobil ödemelerin olumsuz yönleridir. Banka kartları dışında Akıllı telefonu içerisine indirilen (kopyalanan) bilet uygulaması sayesinde telefon bir akıllı karta dönüşerek, destekleyen dolum ve harcama cihazlarında bilet olarak kullanılabilmektedir. Mobil uygulamalar sayesinde telefonda tanımlı akıllı kartlara yine telefona tanımlı mobil kredi kartı uygulamaları ile TL/kontör yüklenebilmekte veya otoyol, köprü ücret ödeme sistemlerin de olduğu gibi TL/kontör belli bir miktarın altına düştüğünde otomatik TL/kontör yükleme gerçekleştirilebilmektedir.

3.4. Kullanım Türüne Göre Yolcu Biletleri

Kullanılan türüne göre yolcu biletleri ‘Kullan-at tipi bilet’ ve ‘Doldur -boşalt tipi bilet’ olmak üzere iki ana kategoriye ayrılmaktadır:

Kullan- at tipi biletler

Daha çok o şehirde yaşamayan veya toplu taşımayı nadiren kullananlar için tek geçiş binişlerinde kullanım amaçlı geliştirilmiştir. Kullanılan şehrin ve ulaşım

sisteminin büyüklüğüne göre 1'lik, 3'lük, 5'lik, 10'luk kullan – at tipi biletler halen aktif olarak kullanılmaktadır. Kullan-at tipi biletler, tercihen kâğıt malzemeden olmakla birlikte çok ince PVC veya PET tabanlı olanlar da mevcuttur. Tek biniş (veya sınırlı geçiş hakkı olan) biletler aktarmalı ve aktarmasız olarak da tanımlanarak kullanılabilmektedir.

Doldur ve boşalt tipi biletler

Sürekli toplu taşıma kullanan yolcuların kontör yüklenip kullandıkça yeniden doldurabileceği şekilde tasarlanmış olup bilet medyası ömrü bitene kadar kullanılabilmektedir. Doldur ve boşalt tipi biletler yolcu ve yolculuk profiline bağlı olarak farklı tiplerde tanımlanabilmekte ve kullanılabilmektedir. Kontör tabanlı kullanımda sadece binilen aracın yolculuk tarifesi kadar kontör düşülerek yolculuk yapılabildiği gibi geçiş (biniş) hakkı kullanılarak da ücret ödemesini sağlayan abonman uygulamaları da mevcuttur. 7 – 15 veya 30 günlük bilet/abonman (süre ve biniş limitli), satın alındığı tarih ve saatten itibaren 7 -15 veya 30 gün geçerli, ilk kullanım tarih ve saatinden itibaren 7 -15 veya 30 gün geçerli biletlerdir. Bir diğer doldur boşalt tipi bilet ise 3 aylık, sezonluk bilet/abonman (süre ve biniş limitli), turist kart uygulaması (süre ve biniş limitli), tekli bilet: 1 yolculuk, tekli bilet (sınırlı sürede – 1 veya 1,5 saatte- birden fazla yolculuk), gidiş-dönüş bileti, çok seyahatli bilet (5'lik, 10'luk, 20'lik), mevsimsel bilet (günlük, haftalık, aylık, yıllık), (Kombine bilet (park et devam et), grup bileti / aile bileti gibi bilet türleri olabilir.

Toplu taşıma hizmeti veren kurumların ve Merkezi İdare'nin kararlarına bağlı olarak, ücretsiz, daha düşük ücretli, belli haklarla sınırlı biletler de sistemde kullanılabilmektedir. 60+, 65+, özürlü, özürlü refakatçisi, asker, polis, PTT mensubu, hâkim/savcı, öğretmen, öğrenci, milli sporcu (yıllık sınırlı biniş limitli), şehit, dul-yetim, gazi yakını, basın mensubu, Belediye Personeli, Zabıta kartı bu tipteki biletlere verilebilecek örneklerdendir.

4. TOPLU ULAŞIMDA YOLCU BİLETLERİNİN FİYATLANDIRILMASI

Yolcu bilet fiyatlandırılması toplu ulaşım politikaları açısından kilit rol oynamaktadır. Sistemin operasyonel süreçlerini ve tasarımını doğrudan etkilediğinden toplu ulaşımın planlamasının ilk aşamalarından itibaren bu konuda bir karar verilmelidir.

4.1. Yolcu Biletlerinin Fiyatlandırması

Toplu ulaşımda temel olarak iki tür yolcu bilet fiyat politikası bulunur. Bunlar; sabit yolcu bileti bedeli ve kademeli bilet bedelleridir.

Sabit Yolcu Bileti Bedeli

Seyahat edilen yolcuya, mesafeye, seyahat gününe veya hizmet kalitesine bağlı olmaksızın aynı ücret bedeli uygulanır. Bu sistem ücret bedeli ödemelerini oldukça basitleştirdiğinden dolayı olası karışıklıklar ve farklı operatörler arasındaki tartışmaları önler. Ayrıca uygulamaya konulması oldukça kolaydır. Diğer yandan uzun seyahatlerde veya özel hizmet sunulan hatlarda daha farklı işletme maliyeti olmasına rağmen aynı ücret bedeli uygulanması adil olmayacaktır. Kademeli bilet bedellerine kıyasla gelir potansiyeli daha düşüktür.

Kademeli Yolcu Bilet Bedelleri

Kademeli ücretlendirme modelleri, gelir potansiyelini artırırken, sistemin karmaşıklığını da beraberinde getirmektedir. Örneğin, Londra'da uygulanan bölgesel ücretlendirme modeli, yolcu yoğunluğunu daha eşit bir şekilde dağıtmayı başarmıştır (Glaister ve Lewis, 1978). Kademeli yolcu bilet ücret bedelleri genel olarak 4 ayrı şekilde uygulanabilir. Bunlar:

- Mesafe bazlı veya bölgesel ücretlendirme: Kat edilen mesafeye bağlı olarak ücretlendirme yapılabilir.
- Zaman bazlı ücretlendirme: Ücretler haftanın günlerine veya gün içinde yolculuk yapılan saatlere bağlı olarak kademelendirilir (örneğin hafta sonunda veya hafta içi pik saati dışında daha düşük ücret politikası uygulanabilir.).
- Hizmet bazlı ücretlendirme: Sunulan hizmetin türü ve kalitesine bağlı olarak ücretler farklılık gösterir (örneğin ekspres hatlarda veya şehir turu yapılan turistik seyahatlerde daha yüksek ücret uygulanabilir).
- Hizmete veya bölgeye bağlı olarak ücretsiz- indirimli ücretlendirme: Özel bölgelerde (şehir merkezindeki bazı alanlar) veya özel amaçlı hatlarda (diğer taşıma modlarına entegrasyon gibi) ücret alınmayabilir veya indirimli ücret uygulanabilir.

Kademeli yolcu bilet bedelleri, sabit yolcu bileti bedeline kıyasla daha adil olduğu ifade edilebilir. Ayrıca gelir potansiyeli yüksektir. Diğer yandan sistemin farkı uygulamalar nedeniyle yolcuların bilet bedelleri sistemini anlaması biraz daha zor olabilir.

4.2. Yolcu Bileti Bedelleri Tahsilat Yöntemleri

Günümüzde artık yaygın olarak kullanılan elektronik biletler kâğıt biletlerde olduğu gibi biletin tahsilatı araç içinde, duraklarda, istasyonlarda veya iskelelerde bilet doğrulama makinaları (validatörler) ile yapılabilmektedir. Lastik tekerlekli

bilet doğrulama makinası (Validatörler) genellikle araçlarda iken, metro, tramvay, vapur gibi toplu taşıma modlarında durak, istasyon veya iskelelerdeki turnikelerde bulunmaktadır. Toplu ulaşım kültürünü geliştiği, güvenin yaygın olduğu ülkelerde sıklıkla görülen bir diğer uygulama ise serbest geçiş sitemidir. Bu sitemde bilet doğrulama işlemi yapılmamakta, yolcular serbestçe araca geçiş yapabilmektedir. Bu sistemde zaman zaman araç içinde bilet kontrolü yapılarak biletsiz yolculara yüklü cezalı ödeme yaptırımlar uygulanmaktadır.

Araç İçi Sürücü Kontrollü Bilet Doğrulama Makinası (Validatör)Tahsilat Sistemleri

Bu sistemlerde ücret ödeme otobüse bindikten hemen sonra sürücü tarafından kontrol edilmek suretiyle gerçekleştirilir. Genellikle sürücü kabinin yanında, sürücünün kontrol edebileceği şekilde bilet toplama kutusu ve/veya ve akıllı kartlar ile biletlere yönelik ayrı bir işlem kutusu yer alır. Bu tarz sistemlerde yer alabilecek alt sistemler aşağıdaki gibi olabilmektedir. Bunlar; akıllı kart okuyucusu olan Elektronik Ücret Kutusu; Manyetik kart okuyuculu validatörler hem manyetik hem de temassız kart okuyuculu validatörler; Araç içerisinde validatör sayaç okuyucusu, istasyon, garaj ve terminallerdeki validatör sayaç okuyucularıdır.

Araç dışında özel bir altyapı sistemi gerektirmediğinden diğer sistem yaklaşımlarına kıyasla daha ekonomiktir. Kaçak binişlerin önlenmesi daha kolaydır. Olumsuz yönlerinin başında yolcuların tek bir kapıdan binmesini ve giriş esnasında ödeme yapmalarını gerektirir. Bu nedenle özellikle yoğun yolculukların gerçekleştiği durak ve hatlarda araçların duraklardaki bekleme süreleri önemli ölçüde artmaktadır. Ayrıca, bireysel validatörlerden gelen verilerin işlenmesi ve konsolide edilebilmesi, validatörlerin bakımı ve hak edişlerin hesaplanması gibi konularda ilave işgücüne ihtiyaç vardır.

Araç İçi Biletçi Kontrollü Validatör (Bilet Doğrulama Makinası) Tahsilat Sistemleri

Bu sistemlerde yolcular biletçiden bilet almak veya önceden satın almış oldukları bileti göstermek suretiyle seyahat ederler. Her bir yolcu kontrol edilir. Bu tarz sistemlerde yer alabilecek alt sistemler aşağıdaki gibi olabilmektedir. İstasyon Yazılımı/Donanımı, Garaj Yazılımı/Donanımı Merkez Birim Yazılımı/Donanımı sistem için gereklidir. Bilet alınması/kontrolü girişte değil, aracın içerisinde gerçekleştirilebildiğinden, sürücü kontrollü sistemlere göre yolcuların araca biniş süreleri daha kısadır ve araçların duraklardaki bekleme süreleri de bu doğrultuda daha azdır. Araç dışı turnikeli geçişlere kıyasla kaçak binişler daha azdır. Lastik tekerlekli toplu ulaşım sisteminde biletçi kontrollü sistemler şehrin

merkezinden uzaktaki bölgeler gibi uzun mesafeli özel taşımacılık yapılan hatlarda tercih edilebilmektedir. Bu sistemler duraklar arası mesafelerin kısa olduğu ve yolcu binişlerinin yüksek olduğu hatlar için verimli değildir. Diğer sistemlere kıyasla daha fazla işgücü ihtiyacı bulunmaktadır. Bunlar; Denetim görevlisi (Yaklaşık olarak 350-400 yolcu başına 1 görevli), bakım görevlisi (Yaklaşık olarak 25 validatör başına 1 görevli), hakkediş ve gelir hesaplamaları görevlisi (Yaklaşık olarak 25 validatör başına 1 görevli), veri işleme / kayıt görevlisi (Yaklaşık olarak 15.000 biniş başına 1 görevli), güvenlik görevlisi (Yaklaşık olarak 15 durak başına 1 görevli), bilet satış görevlileri (Yaklaşık olarak 3.000 yolcu başına 1 görevli) gereklidir.

Araç Dışı Turnike Geçişli Tahsilat Sistemleri

Metro, tramvay, vapur gibi taşıma sistemlerinde genellikle yolcular ya bilet atmak veya elektronik kart-akıllı bilet kullanarak turnikeden geçmek suretiyle bilet doğrulama yapılır. Metrobüs gibi lastik tekerlekli sistemlerde de turnike sistemi yaygındır. Ücret toplama araç dışında gerçekleştiğinden binişlerde ücret ödemeden kaynaklı gecikmeler azaltılmıştır. Araç dışı turnikesiz geçişlere kıyasla kaçak binişler daha azdır. Araç dışı turnikesiz geçişlere kıyasla daha az araç içi denetim görevlisine ihtiyaç vardır. Duraklarda turnikeler için ek bir alan veya platform gerektiğinden özellikle sınırlı fiziki alana sahip koridorlarda uygulanılması zordur. Turnikeli geçişlerde dezavantajlı gruplar için ayrı, uygun geçiş alanları bulunur. Diğer tüm ücret toplama türlerine göre yatırım maliyeti en yüksek olan seçenektir. Zira validatörlere ilave olarak turnikelerin de maliyeti vardır. Diğer sistemlere kıyasla daha fazla işgücü ihtiyacı bulunmaktadır. Bunlar; Bakım görevlisi (Yaklaşık olarak 25 validatör başına 1 görevli), Hak ediş ve gelir hesaplamaları görevlisi (Yaklaşık olarak 25 validatör başına 1 görevli), Güvenlik görevlisi (Durak başına 1 görevli), Veri işleme / kayıt görevlisi (Yaklaşık olarak 15.000 biniş başına 1 görevli), Bilet satış görevlileri (Yaklaşık olarak 3.000 yolcu başına 1 görevli) bulunur.

Araç Dışı Turnikesiz Geçişli Tahsilat Sistemleri

Araç dışı turnikesiz geçiş olan sistemlerde, yolcuların bilet veya geçiş kartlarını (gün, zaman, bölge bilgileri yer alan) araç içinde rastgele denetimlerde denetçi gezici personele göstermeleri gerekmektedir. Bu sistemlerde genellikle bilet satış makineleri ve/veya onaylama makinelerine ihtiyaç vardır. Bazı şehirlerde bire-bir biletlerin okunması yerine belirli dönem için verilmiş olan serbest geçiş kartlarıyla seyahat etme imkânı sağlanmaktadır. Bu yöntemi kullanan şehirlerde yolcular bilet makinalarından veya satış noktalarından aldıkları serbest geçiş katlarını (biletlerini) ilk seyahat başlamadan önce okutmakta bu şekilde serbest geçiş

hakkının başladığı zaman belirlenmekte ve geçerli olduğu sürece olduğu sürece kullanılmaktadır. Bu yöntemi seçen şehirlerde, daha az iş gücü maliyetleri ile tasarruf sağlanırken zaman zaman bilet kontrolü elemanı tarafından yapılan denetimlerle suiistimal edenlerin önüne geçilmesi ve biletin on, yirmi misli vb. gibi yaptırımlarla sistemin etkili çalışması sağlanabilir. Bu sistemlerde yer alabilecek alt sistemler aşağıdaki gibi olabilmektedir. Bunlar, validatörler, validatörler için akıllı kart işlemcisi, durak ve istasyonlarda yer alan asılı validatörler, elde taşınabilir validatörler, istasyon yazılımı/donanımı, garaj yazılımı/donanımı, merkez birim yazılımı/donanımı gereklidir.

Diğer sistemlere kıyasla araca birçok kapıdan binilebileceği için araçların duraklardaki bekleme süreleri kısalmaktadır. Biletçi kontrolündeki sistemlere göre daha az denetim gerekir çünkü denetim ücret ödeme amaçlı değil, sadece kontrol amaçlıdır. Ancak, kaçak biniş riski oranı yüksektir. Yolcu binişleri ve araç içi tasarım göz önüne alınarak denetimlerin nasıl yapılacağı önceden planlanmalıdır. Diğer sistemlere kıyasla daha fazla işgücü ihtiyacı bulunmaktadır. Bunlar; Gezici denetim görevlisi (yaklaşık olarak 3.000 yolcu başına 1 görevli), bakım görevlisi (yaklaşık olarak 25 validatör başına 1 görevli), hakkediş ve gelir hesaplamaları görevlisi (yaklaşık olarak 25 validatör başına 1 görevli), veri işleme / kayıt görevlisi (yaklaşık olarak 15.000 biniş başına 1 görevli), güvenlik görevlisi (Yaklaşık olarak 15 durak başına 1 görevli), bilet satış görevlileri (Yaklaşık olarak 3.000 yolcu başına 1 görevli)

Tablo 1. Yolcu Bilet Bedellerinin Tahsilat Yöntemlerinin Kıyaslanması

Faktör	Araç Dışı Turnikesiz Geçişler	Araç Dışı Turnikeli Geçişler	Araç İçi Biletçi Kontrollü Validatör	Araç İçi Sürücü Kontrollü Validatör
Ekipman İhtiyacı	Bilet satış makinaları, Validatörler, Bayi Satış Ekipmanı, Manuel Denetim Cihazları	Turnikeler, Bilet Satış Makinaları,	Bilet Satış Makinaları, Validatörler, Bayi Satış Ekipmanı, Manuel Denetim Cihazları	Validatörler, Bilet İşleme Birimleri
Durak Özellikleri	Açık veya Platform Duraklar	Turnikeler ve bilet satış makinaları için ek fiziki alan, Planlı giriş ve çıkışlar	Açık platform	-
Yolcu Yoğunluğu	Kalabalık araçlarda denetim sebebiyle sıkıntı yaşanabilir. Yüksek miktarda validatöre ihtiyaç duyulabilir.	Ücret toplama yoğunluktan etkilenmez.	Kalabalık araçlarda denetim sebebiyle sıkıntı yaşanabilir.	Binişler yavaş
Kaçak Binişler	Denetim sıklığına, cezaların caydırıcılığına ve yolcu yoğunluğuna göre değişir.	Turnikelerin üstünden atlayan yolcular olabilir.	Her yolcunu ücreti biletçi tarafından toplandığından asgari düzeydedir; yoğun zamanlarda sıkıntı yaşanabilir.	Kaçak geçiş kartlarına ve yolcu yoğunluğunun aşırı olmasına bağlı olarak oluşabilir.
Taşıma Sistemleri Arasında Aktarmalar	Taşıma sistemleri arasında aktarma mümkündür	Transferlerin yapılabilmesi için taşıma sistemlerinin ortak donatım ve ekipman kullanması gerekir.	Taşıma sistemleri arasındaki aktarma düzenlemeleri biletçi tarafından kontrol edilir.	Özel uygulamalara ihtiyaç vardır.
Bölgesel Ücretlendirme	Uygulaması zordur, doğrulama için kaynak noktasına ihtiyaç vardır.	Çıkışta da turnikelere ve para iade makinelerine ihtiyaç vardır.	-	Yolcu tarafından sürücüye gidilecek yer belirtilerek ödeme yapılır.
Otomatik Ücret Toplama Sistemleri (AFC)	Elektronik bilet ve geçiş kartları (denetçilerin elde taşınabilir kart okuyuculara ihtiyacı vardır)	Geçiş kartları turnikelerde okutulur ve ücret otomatik olarak düşer – hatalı geçişler o an tespit edilir ve izin verilmez.	Biletçilerin elde taşınabilir kart okuyucularına ve işleme birimlerine ihtiyaçları vardır.	Bilet işleme birimleri ve kart okuyucularına ihtiyaç vardır, ücret değişikliği problem olabilir.
Güvenlik ve Müşteri Hizmetleri	Duraklarda ve araç içlerinde denetçiler bulunur. İlave güvenliğe ihtiyaç duyulabilir.	Eğer herhangi bir gişe görevlisi yoksa duraklarda ve araçlarda güvenliğe ihtiyaç duyulabilir.	Tüm araçlarda biletçi vardır.	Güvenlik ve müşteri hizmetlerinden sürücü sorumludur.
Ödeme Kolaylığı	Çoklu binişli ve/veya kontör yüklü kartların dolumlarında	Turnikelerde kabul edilen ödeme tipine bağlı olarak değişir (en kolayı nakit	Önceden yükleme yapılmasına gerek yoktur, ödeme veya	Ön ödeme veya anında ödemeye gerek vardır,

	kuyruk olabilir ancak binişlerde sıkıntı yaşanmaz.	ödemedir); kuyruklar oluşabilir.	binişlerde kuyruk oluşmaz	kuyruk oluşabilir.
Sermaye Maliyetleri	Yüksek yolcu hacimleri olmadığı sürece turnikeli sistemlerden daha düşüktür.	Turnike maliyetleri yüksektir, fakat turnikesiz sistemlere göre daha az validatöre ihtiyaç vardır.	Turnikesiz ve turnikeli sistemlerden daha düşüktür (ihtiyaç duyulan validatör sayısına bağlı olarak)	En düşük maliyetli sistemlerdir.
İşletme Maliyetleri	Turnikeli sistemlere göre işgücü maliyeti daha yüksektir.	Turnikesiz sistemlere göre işgücü maliyeti daha düşüktür.	En yüksek işgücü maliyeti	En düşük işgücü maliyeti

Yolcu bilet bedellerinin tahsilat sistemlerinin yapısı şehirlere, operatörlere, filo büyüklüğüne ve kullanılan teknolojiye göre farklılıklar taşımaktadır. Ücret toplamanın operatörlere maliyeti bu kapsamda değişkenlik göstermekle birlikte toplanan gelirin yaklaşık %1 ila %3'üne tekabül ettiği görülmektedir. Bunun büyük bir çoğunluğunu, teknoloji şirketlerine ödenen ücretler gelmektedir. Bunun dışında bilet satıcılarına her bir bilet için bilet fiyatının yüzdesi olarak ödenen komisyonlar, bilet ve jeton makinalarının çalışabilmesi için gerekli işgücü, enerji ve bakım-onarım maliyetleri ile sistemin bütün halinde geliştirilmesi ve idaresi için personele ödenen ücretlerin toplamı oluşturur. Yolcu bilet bedellerinin tahsilat sistemlerinin bir başka yönü ise yapılan yolculuklarla ilgili zaman, bölge, yolcu profili gibi veri setleri sağlamasıdır. Bu şekilde şehirlerin toplu ulaşım planlamalarının yapılabilmesi, güzergâh ve hat optimizasyonunun sağlanabilmesi ile yeni hatlar ve güzergâhların oluşturulabilmesi yönünde önemli bilgiler elde edilebilmektedir.

5. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Sürdürülebilir Ücret Toplama Sistemi çalışması, sürdürülebilirlik perspektiflerinden toplu ulaşımın önemini vurgularken, toplu taşıma sistemlerinde gelir elde etmenin, kaynakları verimli kullanmanın ve sistemin finansal sürdürülebilirliğini sağlamanın yanı sıra yolcu memnuniyetini, erişilebilirliği ve çevresel sürdürülebilirliği artırmak için önemli bir araç olarak tasarlanmıştır. Toplu ulaşımda ücret toplama, yolcuların toplu taşıma araçlarını kullanabilmek için ödedikleri ücretin toplanması sürecini ifade eder. Bu süreç, genellikle bir bilet, kart veya mobil uygulamalar üzerinden gerçekleştirilir ve bu sistemlerin etkin bir şekilde çalışması, toplu ulaşım hizmetlerinin sürdürülebilirliği ve verimliliği açısından kritik bir öneme sahiptir.

Sürdürülebilir ücret toplama sistemlerinde etkinliğin sağlanması, hem hizmet kalitesinin artırılması hem de yolcuların ihtiyaçlarının karşılanması açısından te-

mel bir unsurdur. Bu etkinliğin sağlanabilmesi için tüm yolcular için kolay erişilebilir ve anlaşılabilir bir ücret toplama sistemi oluşturulması gereklidir. Ücret toplama sisteminde biletleme işlemleri, karmaşık olmadan hızlı ve pratik bir şekilde gerçekleştirilmeli; farklı taşıma türleri (otobüs, metro, tramvay, vapur) arasında entegre bir ödeme sistemi aracılığıyla bir taşıma aracından diğerine geçişlerde aynı kart ve aynı sistem üzerinden ödeme yapılabilmesi sağlanmalıdır. Bu tür bir entegrasyon, sürdürülebilirlik hedefleri açısından büyük önem taşır.

Sürdürülebilirliğin bir diğer boyutu ise toplu ulaşım idaresinin, ücret toplama sisteminin yolculardan ücret tahsilatı, operatörlere dağılımın hesaplanması, tüm ödeme işlemlerinin denetlenmesi, yolcu sayısının takibi ve sistemin verimli çalışmasına olanak sağlamasıdır. Ücretlendirme, toplu taşımayı kullanan tüm yolcular için adil olmalı ve öğrenciler, yaşlılar ve engelli bireyler gibi özel gruplara yönelik destekleyici tarifeler içermelidir. Ayrıca, ücretlerin, şehrin toplu ulaşım sisteminin yaygın kullanımını teşvik edecek şekilde, toplu ulaşımın sürdürülebilirliği göz önünde bulundurularak belirlenmesi gerekmektedir.

Yolculardan alınan ücretlerin doğru bir şekilde tahsil edilmesi ve bu sürecin etkin bir şekilde yönetilmesi, toplu ulaşım sisteminin işletme maliyetlerinin karşılanabilmesi ve herkes için erişilebilir hale getirilebilmesi açısından kritik bir öneme sahiptir. Toplu ulaşım sistemlerinde ücret toplama, başlangıçta daha az teknoloji gerektiren, düşük maliyetli, basit ve anlaşılır kâğıt biletler, nakit ödemeler ve manuel işlemlerle yürütülmekteydi. Ancak günümüzde, hızlı ödeme imkânı sunan, gelir yönetimi ve veri analizine olanak tanıyan teknoloji tabanlı uygulamalara doğru bir dönüşüm yaşanmaktadır.

Sürdürülebilir ücret toplama sistemleri, sistemin finansal sürdürülebilirliğini sağlamakla kalmayıp aynı zamanda erişilebilirlik, verimlilik, hizmet kalitesi, dijitalleşme ve çevre dostu uygulamalar gibi birçok önemli faktörün yönetilmesine de katkı sunmaktadır. Bu sistemlerde biletleme işlemleri, karmaşık olmadan hızlı ve pratik bir şekilde gerçekleştirilmeli ve otobüs, metro, tramvay gibi farklı taşıma türleri arasında bütünleşmiş bir ödeme sistemi aracılığıyla yolcuların aynı kartı kullanarak farklı araçlara geçiş yapabilmesine olanak tanımalıdır.

Ücret toplama süreçlerinde tüm yolcular için adil ücretlendirme politikalarının benimsenmesi ve öğrenci, yaşlı, engelli gibi özel gruplar için destekleyici tarifeler uygulanması, sistemin sürdürülebilirliğinin göstergelerinden biridir. Ayrıca, yolcu bilet ücretlerinin, şehrin toplu ulaşım sisteminin yaygın kullanımını teşvik edecek şekilde belirlenmesi önemlidir. Elektronik biletler, akıllı kartlar ve mobil ödeme yöntemleri gibi yenilikler, kâğıt bilet kullanımını azaltarak çevresel etkileri en aza indirmekte ve sistemin dijitalleşmesi sayesinde veri toplama ve analiz

süreçlerini kolaylaştırarak verimliliği artırmakta, daha iyi planlama olanakları sunmaktadır.

Sonuç olarak, toplu ulaşımda sürdürülebilir ücret toplama sistemleri, yalnızca finansal sürdürülebilirliği sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda kullanıcı memnuniyetini artırmak ve çevresel etkileri minimize etmek için de önemli bir araçtır. Dijitalleşme, otomasyon ve veri analitiği gibi teknolojik çözümler, gelecekte bu sistemlerin başarısını daha da artıracaktır.

KISALTMALAR

AFC: Automatic Fare Collection (Otomatik Ücret Toplama)

IoT: Internet of Things (Nesnelerin İnterneti)

GPS: Global Positioning System (Küresel Konumlandırma Sistemi)

RFID: Radio Frequency Identification (Radyo Frekansı ile Tanımlama)

NFC: Near Field Communication (Yakın Alan İletişimi)

GPRS: General Packet Radio Service (Genel Paket Radyo Servisi)

OD Matrisi: Origin-Destination Matrix (Başlangıç-Bitiş Matrisi)

TEŞEKKÜR

Yazarlar arasında veya bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır. Çalışma, bağımsız bir şekilde bilimsel etik ve akademik standartlar çerçevesinde gerçekleştirilmiştir.

KAYNAKLAR

Al-Sakran, H. O. (2015). Intelligent traffic information system based on integration of IoT and agent technology. International Journal of Advanced Computer Science and Applications, 6(2), 23-29.

Bandyopadhyay, D., & Sen, J. (2011). The Internet of Things - Applications and challenges in technology and standardization. Wireless Personal Communications, 58(1), 49–69.

Bieler, M., Skretting, A., Büdinger, P., & Grønli, T. M. (2022). Survey of automated fare collection solutions in public transportation. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 23(9), 14248–14252.

Durgaprasad, C., & Rajesh, G. (2016). Automatic Fare Collection System in Public Transportation. International Journal of Scientific Engineering and Technology Research, 5(47), 9120-9124.

Faroqi, H., Mesbah, M., & Kim, J. (2018). Applications of transit smart cards beyond a fare collection tool: A literature review. Advances in Transportation Studies: An International Journal, Section B, 45, 107–110.

Glaister, S., & Lewis, D. (1978). An integrated fares policy for transport in London. Journal of Public Economics, 9(4), 341-355.

Gyger, T., & Desjeux, O. (2001). EasyRide: Active transponders for a fare collection system. IEEE Micro, 21(3), 36–43.

Hatipoğlu, S. (2017). Otobüs sistemi ücret ödeme şekli ve çeşitliliğinin dünya örnekleri incelenerek Ankara için modellenmesi. Ankara Araştırmaları Dergisi, 5(2), 273–282.

Isern-Deyà, A. P., Vives-Guasch, A., Mut-Puigserver, M., Payeras-Capellà, M., & Castellà-Roca, J. (2012). A secure automatic fare collection system for time-based or distance-based services with revocable anonymity for users. The Computer Journal, 55(3), 313–326.

Jose, S., Anto, D., Robin, K. M., & Kumar, S. (2020). An efficient method for bus status and fare collection. International Journal of Scientific Research & Engineering Trends, 6(3), 1874.

Joshi, A., Chavan, Y., Kale, A., Patkar, P., & Tawde, G. (2023). Automated public transport fare collection system using RFID. International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), 12(8), 1–8.

Keote, M., Gaykwad, U., Sontakkey, S., Deshmukh, S., & Bansod, K. (2024). Design and development of automatic bus fare collection system using RFID technology. Proceedings of the 5th International Conference for Emerging Technology (INCET), Karnataka, India.

Kelagadi, H. M., Kumar, N., Laxmikant, S. A., & Mrityunjaya, D. H. (2017). Smart transportation using IoT technologies. International Conference on IoT in Social, Mobile, Analytics, and Cloud (I-SMAC), 1-5.

Li, D., Lin, Y., Zhao, X., Song, H., & Zou, N. (2011). Estimating a transit passenger trip origin-destination matrix using automatic fare collection systems. Lecture Notes in Computer Science, 6637, 502-513.

Lopez, T. S., Ranasinghe, D. C., & McFarlane, D. (2012). Adding sense to the Internet of Things: An architecture framework for smart object systems. Personal and Ubiquitous Computing, 16(3), 291–308.

Manikandan, T., Kalaiyarasi, G., Priyadarshini, P. K., & Priyaranga, P. R. (2015). Conductor-less Bus Ticketing System Using RFID and Information through GPS and GSM. IJISET - International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology, 2(9), 45-49.

Miorandi, D., Sicari, S., Pellegrini, F. D., & Chlamtac, I. (2012). Internet of Things: Vision, applications and research challenges. Ad Hoc Networks, 10(7), 1497–1516.

Salim, S., Saini, P., & Gupta, S. (2013). Design and implementation of web-based GPS-GPRS vehicle tracking system. International Journal of Computer Science and Engineering Technology, 4(12), 1170-1176.

Singh, D., Tripathi, G., & Jara, A. J. (2013). A survey of Internet-of-Things: Future vision, architecture, challenges and services. IEEE World Forum on Internet of Things, 1, 292–299.

Svečko, J., Kotnik, B., Mezgec, Z., & Chowdhury, A. (2010). The Margento Automated Fare Collection System Solution for Public Transport. Proceedings of the 7th International Conference on Logistics & Sustainable Transport, Maribor, 24-26 June 2010.

Tellluri, P., Manam, S., & Oli, J. (2019). Automated Bus Ticketing System Using RFID. IEEE International Conference on Innovations in Information Technology. https://doi.org/10.1109/ICICICT46008.2019.8993159.

Tirachini, A., & Hensher, D. A. (2011). Bus congestion, optimal infrastructure investment, and the choice of a fare collection system in dedicated bus corridors. Transportation Research Part B, 45(6), 828–844.

Utsunomiya, M., Attanucci, J., & Wilson, N. (2006). Potential uses of transit smart card registration and transaction data to improve transit planning. Transportation Research Record, 1971, 119–126.

Witvoet, K., Vidal, C., Stiene, T., & Emadi, A. (2024). Towards frictionless public transit: A brief review of automatic fare collection. *IEEE International Conference on Smart Mobility, 1–5.

Zanella, A., Bui, N., Castellani, A., Vangelista, L., & Zorzi, M. (2014). Internet of Things for smart cities. IEEE Internet of Things Journal, 1(1), 22-32.

Zhao, J., Rahbee, A., & Wilson, N. H. M. (2007). Estimating a Rail Passenger Trip Origin-Destination Matrix Using Automatic Data Collection Systems. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 22(5), 376-387.

Zhu, H., Cao, Z., & Liu, D. (2012). Intelligent transportation system based on Internet of Things. Proceedings of WAC, 2, 230–235.

BÖLÜM 26

Commer TS3 Dizel Motoru İçin Biyel Kolu Optimizasyonu Ve Gerilme Analizi

Necati Koçak[1] & Hüseyin Uzun[2] & Nuri Ergin[3]

[1] Arş. Gör., Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Sakarya, Türkiye, ORCID ID: 0000-0002-0768-3479
[2] Prof. Dr., Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Sakarya, Türkiye, ORCID ID: 0000-0003-0137-6141
[3] Dr. Öğr. Üyesi, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Sakarya, Türkiye, ORCID ID: 0000-0001-9025-9419

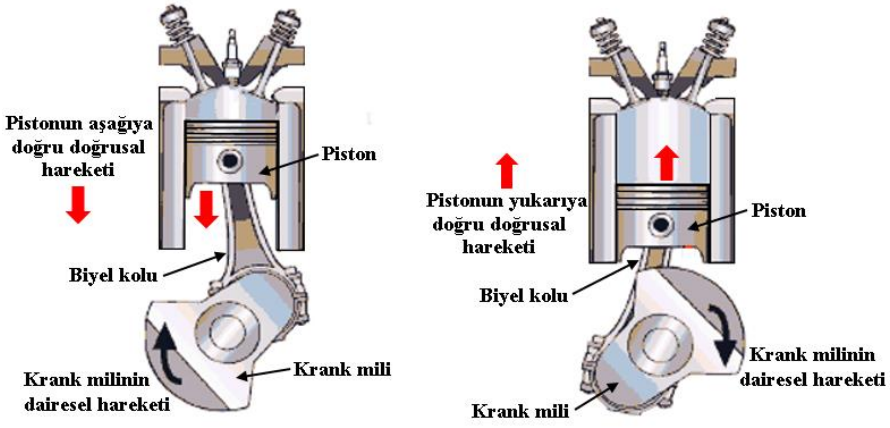
1. Giriş

Motorların en önemli bağlantı parçalarından birisi, biyel kolu veya diğer bir tanımla piston koludur. Geleneksel biyel kolları, krank mili ile pistonu birbirine bağlayan motor parçalarıdır. Geleneksel biyel kolu, üç ana kısımdan meydana gelir: (1) Biyel kolunun krank miline bağlandığı biyel başı kısmı, (2) Biyel kolunun pimle pistona bağlandığı biyel ayağı kısmı ve (3) Biyel başı ile biyel ayağı arasında kalan biyel gövde kısmı (Şekil 1).

Biyel kolunun ayak kısmı, piston pimi yardımıyla pistona ve biyel başı kısmı ise krank pimi vasıtasıyla krank miline bağlıdır. Motor silindiri içerisindeki pistonun aşağı-yukarı yaptığı doğrusal hareket, biyel kolu vasıtasıyla dairesel hareket çevrilir ve böylece krak milinin dairesel hareket etmesi sağlanır (Şekil 2).



Şekil 1. Geleneksel biyel kolunu (piston kolunu) oluşturan kısımlar.



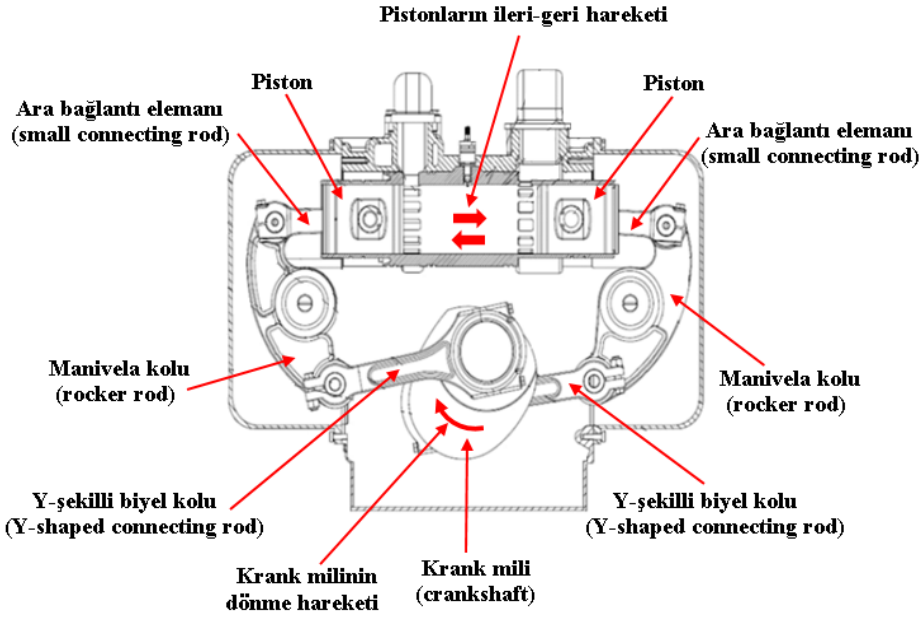
Şekil 2. Geleneksel biyel kolunun çalışma prensibi.

Motorun çalışması esnasında mekanik olarak en çok yüklenen parçalardan birisi, biyel koludur. Çünkü hareket halinde iken çeşitli gerilmelere, burulmalara, sıkışmalara, titreşimlere ve dinamik yüklere maruz kalır. Yanma odasında oluşan yüksek basınç sayesinde pistonun hareket etmesi, biyel kolunun yüksek basma ve çekme yüklerine maruz kalmasına sebep olur. Aynı zamanda motorun döngüsel çalışması esnasında da milyonlarca tekrar eden yüke ve ani hız değişimlerine maruz kalır. Bu nedenle biyel kolu yorulur. Diğer taraftan pistonun hareketi esnasında yan kuvvetler oluşabilmekte ve biyel kolunu yanal olarak zorlayarak dengesiz yüklemelerin oluşmasına yol açabilmektedir. Ayrıca pistonun hareketi esnasında oluşan atalet kuvvetlerini azaltmak için biyel kolunun yeterince hafif olması da beklenir. Tüm bu etkenler dikkate alındığında biyel kolu imalatında kullanılacak malzemelerin mümkün olduğunca hafif ve en yüksek mekanik performansı verebilecek nitelikte olması amaçlanır. Bu nedenle biyel kollarının kusursuz geometrik tasarımı ve mekanik gereksinimlere cevap verebilecek malzeme seçimi, mühendislik açısından iyi bir analizi ve titiz bir çalışmayı gerektirir [1-8].

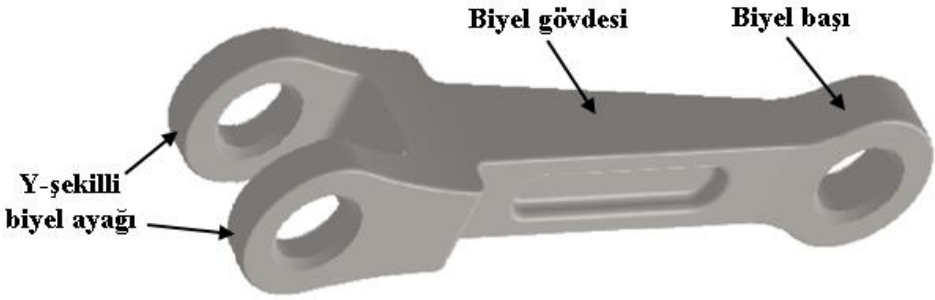
Ağır vasıta motoru üreten firmalar, minimum bakım maliyetini ve aşınma problemlerini azaltmak amacıyla çeşitli dizel motor tasarımları yapmışlardır. Bu firmalardan Rootes Group içinde yer alan Commer marka kamyon üretici firması "Tilling-Stevens" tarafından "Commer TS3" adı verilen üç silindirli bir dizel motor (crank-rocker engine) geliştirilmiştir. Geliştirilen bu motor sayesinde, yakıt tasarrufu sağlanmış ve daha düşük yüklere maruz kalan krank milinin ömrü uzatılmıştır. Commer TS3 dizel motorunda geleneksel motorlardan farklı olarak piston ile krank mili arasındaki bağlantı mekanizması değiştirilmiştir. Geleneksel motorlarda piston ile krank mili arasındaki bağlantı, bir biyel kolu vasıtasıyla yapılır (Şekil 1 ve 2). Commer TS3 dizel motorunda ise krank miline bağlı bir biyel kolu (connecting rod), biyel koluna bağlı bir manivela kolu (rocker rod) ve manivela kolu ile pistonun ara bağlantı elemanıyla bağlandığı bir mekanizma geliştirilmiştir (Şekil 3). Bu farklı mekanizma nedeniyle geleneksel motorlarda kullanılan biyel kolundan farklı geometrik şekle sahip, Y-şekilli biyel kolu kullanılır (Şekil 4). Bu motorlardaki Y-şekilli biyel kolunun işlevi ise manivela kolundan gelen salınım hareketini, krank milinin dönme hareketine dönüştürmektir [9-11].

Bu çalışmanın amaçlarından birisi "Commer TS3" motorunda kullanılan Y-şekilli biyel kolunun daha verimli ve ekonomik olabileceği yeni bir geometrik tasarımını yapmaktır. Daha sonra mevcut kullanılan ve yeni tasarlanan her iki biyel kolunun, verilen yükleme koşulları için Von-Mises gerilmelerini belirlemek amacıyla statik analiz yapmaktır.

Bu çalışmanın diğer amacı ise “Solidworks Simulation” yardımıyla mevcut kullanılan ve yeni tasarlanan Y-şekilli biyel kollarının imalatında, en yüksek performası sağlayabilecek malzeme çeşidini seçmek için analizler yapmak ve elde edilen değerleri karşılaştırmaktır. Bu kapsamda, teorik olarak hesaplanan veriler, Solidworks similasyonuna entegre edilerek her iki biyel kolunun geometrik boyutlandırılması yapılmıştır. Y-şekilli biyel kollarının imalatında kullanılabilecek AISI 1020 ve St 37-2 çelik, AISI 304 paslanmaz çelik, AA 7075-O alüminyum alaşımı ve Pirinç (CuZn37) olmak üzere beş farklı aday malzeme seçilmiştir. Bu malzemelerin performansını değerlendirmek amacıyla detaylı analizler gerçekleştirilmiştir. Uygulanan sanal çekme testi ve yük dağılımı incelenerek kullanılabilecek malzemelerin optimum mekanik gereksinimlere uygunluk düzeyleri belirlenmiş ve en uygun aday malzeme önerisinde bulunulmuştur.



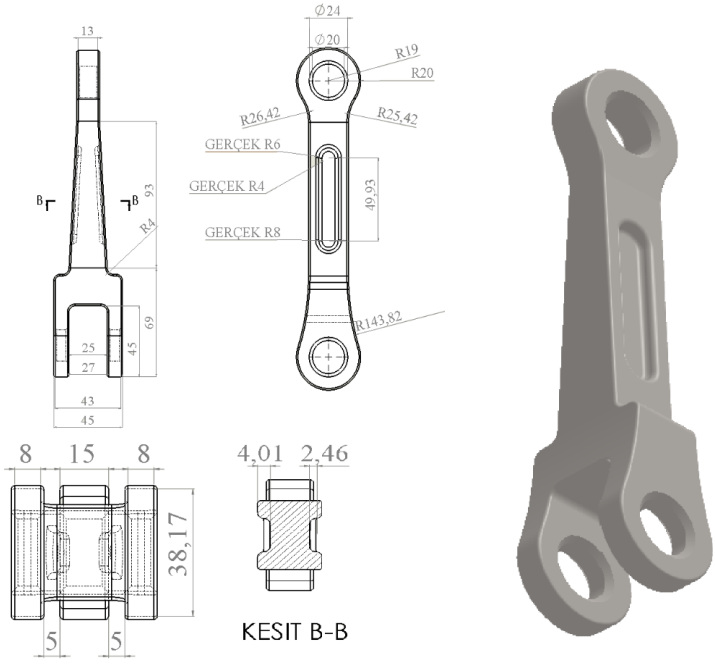
Şekil 3. Commer TS3 dizel motorunda biyel – krank mili bağlantı mekanizması [10].



Şekil 4. Commer TS3 dizel motorunda manivela kolu – krank mili arasındaki bağlantıyı sağlayan Y-şekilli biyel kolunun kısımları.

2. Tasarım ve Analiz Çalışmaları

Bu çalışma kapsamında, Commer TS3 dizel motoruna ait orijinal biyel kolu, detaylı bir şekilde incelenmiş ve geometrik boyutları tespit edilmiştir. Şekil 5'te "Commer TS3" motorunda kullanılan orijinal Y-şekilli biyel kolunun teknik resim çizimi ve üç boyutlu görüntüsü verilmiştir.



Şekil 5. "Commer TS3" motorunda kullanılan orijinal Y-şekilli biyel kolunun teknik resim çizimi ve üç boyutlu görüntüsü.

Y-şekilli biyel kollarının imalatında kullanılabilecek AISI 1020 (EN C22) ve St 37-2 (EN S235JR) çelik, AISI 304 (EN X5CrNi18-10) paslanmaz çelik, AISI AA 7075-O alüminyum alaşımı ve CuZn37 pirinç alaşımı olmak üzere beş farklı aday malzeme seçilmiştir. Yapılan analiz sonuçlarına göre maliyeti daha düşük ve performans açısından en uygun malzeme türü tespit edilmeye çalışılmıştır.

Tablo 1'de Y-şekilli biyel kollarının imalatında kullanılabilecek AISI 1020 (EN C22) ve St 37-2 (EN S235JR) çelik, AISI 304 paslanmaz çelik, AISI AA 7075-O alüminyum alaşımı ve CuZn37 pirinç alaşımına ait kimyasal içerikler verilmiştir. Tablo 2'de de bu malzemelerin mekanik özellikleri yer almaktadır.

Aday malzemelerden AISI 1020 (EN C22) düşük karbonlu çeliğin kaynaklanabilirliği, dövülebilirliği, işlenebilirliği oldukça yüksektir. Bu çeliğin çekme mukavemeti yaklaşık ~550 MPa, akma mukavemeti ~300 MPa ve % uzama değeri ise 22 cıvarındadır [12]. DIN St 37-2 (EN S235JR) çeliği, düşük karbon içeriği sayesinde iyi kaynaklanabilirlik ve mükemmel form verilebilirlik özelliğine sahiptir. Bu çeliğin çekme mukavemeti 340- 470 MPa arasında, akma mukavemeti ~225 MPa ve % uzama değeri ise ~25 cıvarındadır [13].

AISI 304 (EN X5CrNi18-10) östenitik paslanmaz çeliğin korozyon direnci oldukça yüksektir. Çekme mukavemeti ~600 MPa, akma mukavemeti ~175 MPa ve % uzama değeri ise ~35 cıvarında olan bu paslanmaz çelik, imalatta fiyat-performans avantajı açısından tercih edilen bir paslanmaz çelik türüdür [14].

AISI AA 7075-O alüminyum alaşımı, sahip olduğu düşük yoğunluk ve yüksek mukavemet özellikleri nedeniyle hafif metaller grubunda yer alır. Çekme mukavemeti ~225 MPa ve akma mukavemeti ~105 MPa cıvarındadır [15]. EN CuZn37 alaşımı, tuzlu suya ve su buharına karşı oldukça direnç gösteren bakır-çinko alaşımıdır. Çekme mukavemeti ~400 MPa arasında değişen ve akma mukavemeti ~150 MPa olan yüksek korozyon direncine sahip ve sıcak dövme işlemine uygun bir alaşımdır [16].

Tasarım çalışmaları, "Solidworks Simulation" uygulaması ile sonlu elemanlar analizi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi; nümerik bir teknik olup, özellikle katı mekaniği, akışkanlar mekaniği, ısı transferi ve titreşim gibi problemlerin bilgisayar yardımıyla çözümünde, gerçeğe en yakın sonuçların alındığı gelişmiş bir programlama tekniği olarak bilinmektedir. Sonlu elemanlar tekniği sayesinde karmaşık geometrik yapı, daha basit birbirine bağlı küçük bölgelere ayrılarak analiz yapılır. Bu sonlu elemanlarda sürekli fonksiyonların tanımlanabileceği kabul edilir. Her bir elemanın düğüm noktalarındaki değerler, sürekli olan denklemlerin çözümü ile elde edilir [17].

Bu çalışmadaki biyel kolunun sanal çekme analizinde 10 000 N'luk sabit kuvvet kullanılmıştır. Biyel koluna gelen bu kuvvet, 2 emniyet katsayısı uygulanarak hesaplanmıştır. Sonlu elemanlar analizinde aşağıdaki adımlar uygulanmıştır:

(1) İlk aşama olarak iki veya üç boyutlu model hazırlanmıştır.

(2) Sonlu elemanlar metodu ile analiz yapmak için incelenen yapı alt parçalara (mesh) ayrılarak nodlar (düğüm noktaları) ve bu düğüm noktalarından birbiri ile birbirine bağlı olan elemanlar elde edilmiştir.

(3) Bir elemanın fiziksel davranışını temsil eden bir şekil fonksiyonu olduğu varsayılmıştır.

(4) Bir eleman için denklemler geliştirilmiştir.

(5) Tüm problemi temsil edecek şekilde elemanlar birleştirilmiş ve direngenlik matrisi oluşturulmuştur.

(6) Sınır ve başlangıç koşulları belirlenmiş ve yükleme uygulanmıştır.

Tablo 1. Tasarlanan biyel kolunun imalatında kullanılması düşünülen malzemelerin kimyasal bileşimleri [12-16].

Kimyasal Bileşim (%)	**Malzeme Standardı**				
	AISI 1020	**DIN St 37-2**	**AISI 304**	**AISI AA 7075-O**	**EN CuZn37**
C	0.18-0.25	0.17	0.08	-	-
Si (max.)	0.40	0.01	0.75	0.26	-
Mn	0.30-0.60	0.42	2	0.21	-
P (max.)	0.045	0.02	0.045	-	-
S (max.)	0.045	0.02	0.030	-	-
Cr	0.09	0.06	18-20	0.23	-
Mo	0.01	-	-	-	-
Cu	0.1	-	-	1.21	62-64
Fe	Kal.	Kal.	-	-	0.1
Ni	0.07	-	8-10.5	0.04	0.3
Zn	-	-	-	0.04	37
Pb	-	-	-	0.02	0.1
Al	0.01	-	-	Kal.	0.05
Mg	-	-	-	1.97	-

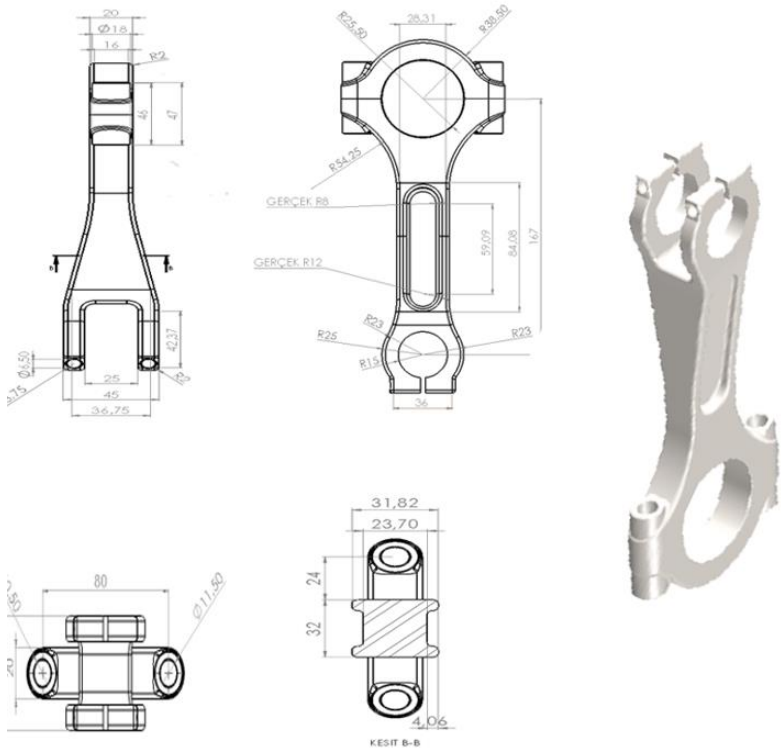
Tablo 2. Tasarlanan biyel kolunun imalatında kullanılması düşünülen malzemelerin mekanik özellikleri [12-16].

Malzeme Özellikleri	Malzeme Standardı				
	AISI 1020 (16 < t < 40 mm)	**DIN St 37-2** (t >16 mm)	**AISI 304**	**AISI AA 7075-O**	**EN CuZn37**
Akma Mukavemeti (MPa)	300	225	175	105	150
Çekme Mukavemeti (MPa)	550	340- 470	600	225	400
Elastik Modülü (GPa)	186	210	195	71.7	110
% Uzama	22	25	35	17	10
Poisson Oranı	0.29	0.30	0.29	0.33	0.30
Yoğunluk (gr/cm^3)	7.87	7.85	8.00	7.85	8.44
Kayma Modülü (GPa)	72	81	86	26.9	40

3. Tasarın ve Analiz Sonuçları

Commer TS3 dizel motoru için daha ekonomik ve daha yüksek mekanik performans elde edilebileceği düşünülen yeni bir biyel kolu tasarımı yapılmıştır. Orijinal biyel kolundan farklı olarak, tasarlanan yeni biyel kolunun gerek biyel başı, gerek Y-şekilli biyel ayağı yuvaları yarım ay şeklinde tasarlanmıştır. Bu yarım ay yuvaları, bir biyel kepi kullanılarak cıvata yardımıyla biyel başına bağlanarak kapatılmıştır. Ayrıca orijinal biyel gövdesine göre daha düşük kesitli gövde tasarlanmıştır.

Şekil 6'da Commer TS3 dizel motoru için yeni tasarlanan Y-şekilli biyel kolunun teknik resim çizmi ve üç boyutlu gösterilişi verilmektedir.



Şekil 6. "Commer TS3" motoru için yeni tasarlanan Y-şekilli biyel kolunun teknik resim çizimi ve üç boyutlu görüntüsü.

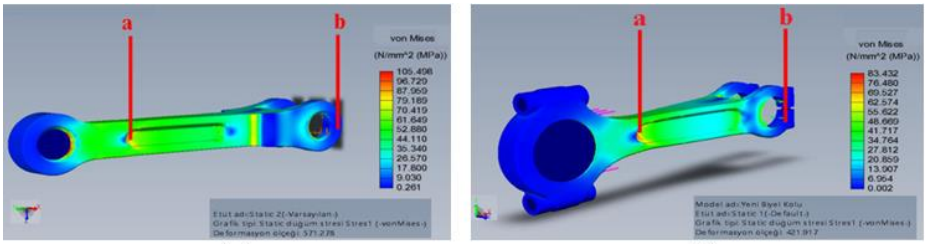
3.1 Von-Mises Gerilme Dağılımı Analiz Sonuçları

Commer TS3 dizel motorunda kullanılan orijinal Y-şekilli biyel kolunun ve bu biyel kolunun yerine kullanılabilecek yeni tasarlanan biyel kolunun sanal çekme gerilme analizleri yapılmış ve sonuçları karşılaştırılmıştır.

Statik yük altında yapılan çekme analizinde hem orijinal hem de tasarlanan Y-şekilli biyel kollarının ayak kısmının ucundaki gerilim değeri "b" harfiyle gösterilmiştir. Biyel gövdesinin biyel başına yakın kısmındaki gerilim değeri ise "a" harfiyle simgelenmiştir (Şekil 7 ve 8).

Şekil 7 (a)'da Commer TS3 dizel motorunda kullanılan orijinal ve Şekil 7 (b)'de tasarlanan biyel kollarının Y-şekilli ayak kısmındaki tek yuva deliğinden statik yük uygulanarak gerçekleştirilen sanal çekme deneyi sonucunda oluşan Von-Mises gerilmeleri gösterilmektedir. Şekil 7 (a)'da görüldüğü gibi, biyel gövdesinin biyel başına yakın kısmındaki (a noktası) gerilme değeri (105.498 MPa),

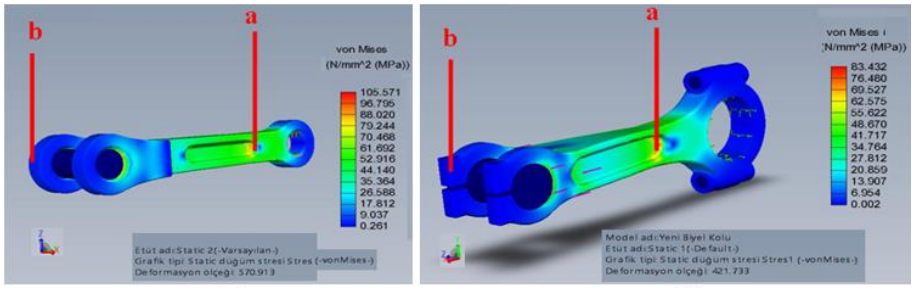
biyelin diğer kısımlarındaki gerilme değerlerinden daha yüksektir. En düşük gerilme (0.261 MPa) ise biyel kolunun ayak kısmının ucundaki (b noktası) değerdir. Şekil 7 (b)'de görüldüğü gibi, biyel gövdesinin biyel başına yakın kısmındaki (a noktası) gerilme değeri (83.432 MPa), biyelin diğer kısımlarındaki gerilme değerlerinden daha yüksektir. En düşük gerilme (0.002 MPa) ise biyel kolunun ayak kısmının ucundaki (b noktası) değerdir.



(a) **(b)**

Şekil 7. Commer TS3 dizel motorunda kullanılan (a) orijinal ve (b) tasarlanan biyel kollarının Y-şekilli ayak kısmındaki tek yuva deliğinden statik yük uygulanarak gerçekleştirilen sanal çekme deneyi sonucunda oluşan Von-Mises gerilim dağılımı

Şekil 8 (a)'da Commer TS3 dizel motorunda kullanılan orijinal ve Şekil 8 (b)'de tasarlanan biyel kollarının Y-şekilli ayak kısmındaki iki yuva deliğinden iki yuva deliğine pim geçirilerek orta kısmından statik yük uygulanarak gerçekleştirilen sanal çekme deneyi sonucunda oluşan Von-Mises gerilmeleri gösterilmektedir. Şekil 8 (a)'da görüldüğü gibi, biyel gövdesinin biyel başına yakın kısmındaki (a noktası) gerilme değeri (105.571 MPa), biyelin diğer kısımlarındaki gerilme değerlerinden daha yüksektir. En düşük gerilme (0.261 MPa) ise biyel kolunun ayak kısmının ucundaki (b noktası) değerdir. Şekil 8 (b)'de görüldüğü gibi, biyel gövdesinin biyel başına yakın kısmındaki (a noktası) gerilme değeri (83.432 MPa), biyelin diğer kısımlarındaki gerilme değerlerinden daha yüksektir. En düşük gerilme (0.002 MPa) ise biyel kolunun ayak kısmının ucundaki (b noktası) değerdir.



(a) **(b)**

Şekil 8. Commer TS3 dizel motorunda kullanılan (a) orijinal ve (b) tasarlanan biyel kollarının Y-şekilli ayak kısmındaki iki yuva deliğinden iki yuva deliğine pim geçirilerek orta kısmından statik yük uygulanarak gerçekleştirilen sanal çekme deneyi sonucunda oluşan Von-Mises gerilim dağılımı

Sonuç olarak, orijinal biyel kolunda ve tasarlanan biyel kolunda meydana gelen Von-Mises gerilim dağılımları karşılaştırıldığında, tasarlanan biyel kolundaki Von-Mises gerilim dağılımlarının daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Dolayısıyla yeni tasarlanan biyel kolunun geometrik şekli, gerilim dağılımı açısından orijinal biyel koluna göre daha avantajlı olduğu söylenebilir.

3.2 Birim Şekil Değiştirme Analiz Sonuçları

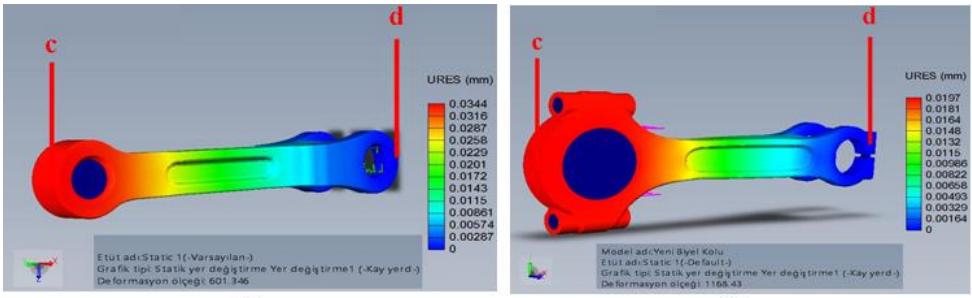
3.2.1 AISI 1020 (EN C22) Çelik Kullanılarak Tasarlanan Biyel Kolu Modeli

Commer TS3 dizel motorunda kullanılan ve AISI 1020 çeliğinden imal edilmesi düşünülen orijinal ve tasarlanan Y-şekilli biyel kollarının sanal çekme sonucu meydana gelen birim şekil değiştirme analizleri yapılmış ve sonuçları karşılaştırılmıştır.

Statik yük altında yapılan çekme analizinde hem orijinal hem de tasarlanan Y-şekilli biyel kollarının ayak kısmının ucundaki şekil değiştirme değeri "d" harfiyle gösterilmiştir. Biyel başı ucundaki şekil değiştirme değeri ise "c" harfiyle simgelenmiştir (Şekil 9 ve 10).

Şekil 9 (a)'da Commer TS3 dizel motorunda kullanılan orijinal ve Şekil 9 (b)'de tasarlanan biyel kollarının Y-şekilli ayak kısmındaki tek yuva deliğinden statik yük uygulanarak gerçekleştirilen sanal çekme deneyi sonucunda oluşan şekil değiştirme değerleri gösterilmektedir. Şekil 9 (a)'da görüldüğü gibi, biyel başındaki (c noktası) şekil değiştirme değeri 0.0344 mm olup, biyelin diğer kısımlarındaki şekil değiştirme miktarlarından daha yüksektir. Biyel kolunun hiç şekil değiştirmeyen kısmı ise ayak kısmıdır (d noktası). Şekil 9 (b)'de görüldüğü gibi, biyel başındaki (c noktası) şekil değiştirme değeri 0.0197 mm olup, biyelin diğer

kısımlarındaki şekil değiştirme miktarlarından daha yüksektir. Tasarlanan biyel kolunun hiç şekil değiştirmeyen kısmı ise ayak kısmıdır (d noktası).

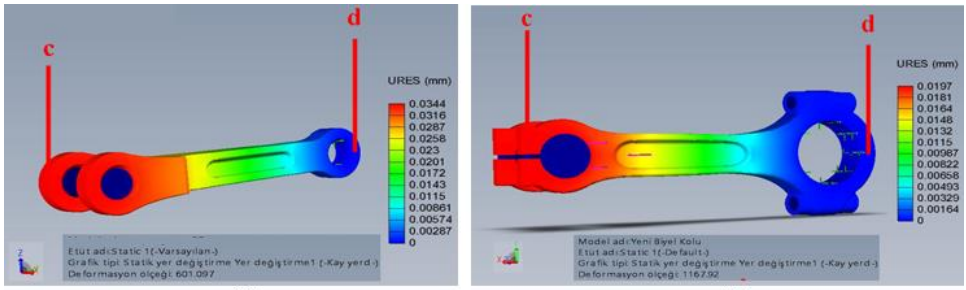


(a) **(b)**

Şekil 9. Commer TS3 dizel motorunda kullanılan ve AISI 1020 çeliğinden imal edilmesi düşünülen (a) orijinal ve (b) tasarlanan biyel kollarının Y-şekilli ayak kısmındaki tek yuva deliğinden statik yük uygulanarak gerçekleştirilen sanal çekme deneyi sonucunda oluşan şekil değiştirme değerleri

Şekil 10 (a)'da Commer TS3 dizel motorunda kullanılan orijinal ve Şekil 10 (b)'de tasarlanan biyel kollarının Y-şekilli ayak kısmındaki iki yuva deliğinden iki yuva deliğine pim geçirilerek orta kısmından statik yük uygulanarak gerçekleştirilen sanal çekme deneyi sonucunda oluşan şekil değiştirme değerleri gösterilmektedir. Şekil 10 (a)'da görüldüğü gibi, biyel başındaki (c noktası) şekil değiştirme değeri 0.0344 mm olup, biyelin diğer kısımlarındaki şekil değiştirme miktarlarından daha yüksektir. Biyel kolunun hiç şekil değiştirmeyen kısmı ise ayak kısmıdır (d noktası). Şekil 10 (b)'de görüldüğü gibi, tasarlanan biyel kolunun baş kısmındaki (c noktası) şekil değiştirme değeri 0.0197 mm olup, biyelin diğer kısımlarındaki şekil değiştirme miktarlarından daha yüksektir. Tasarlanan biyel kolunun hiç şekil değiştirmeyen kısmı ise ayak kısmıdır (d noktası).

Sonuç olarak, AISI 1020 çeliğinden imal edilmesi düşünülen orijinal biyel kolunda ve tasarlanan biyel kolunda meydana gelen şekil değiştirme miktarları karşılaştırıldığında, tasarlanan biyel kolunun baş kısmındaki şekil değişiminin daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Dolayısıyla yeni tasarlanan biyel kolunun geometrik şekli, birim şekil değiştirme açısından orijinal biyel koluna göre daha avantajlı olduğu söylenebilir.



(a) **(b)**

Şekil 10. Commer TS3 dizel motorunda kullanılan ve AISI 1020 çeliğinden imal edilmesi düşünülen (a) orijinal ve (b) tasarlanan biyel kollarının Y-şekilli ayak kısmındaki iki yuva deliğine pim geçirilerek orta kısmından statik yük uygulanarak gerçekleştirilen sanal çekme deneyi sonucunda oluşan şekil değiştirme değerleri

3.2.2 DIN St37-2 (EN S235JR) Çelik Kullanılarak Tasarlanan Biyel Kolu Modeli

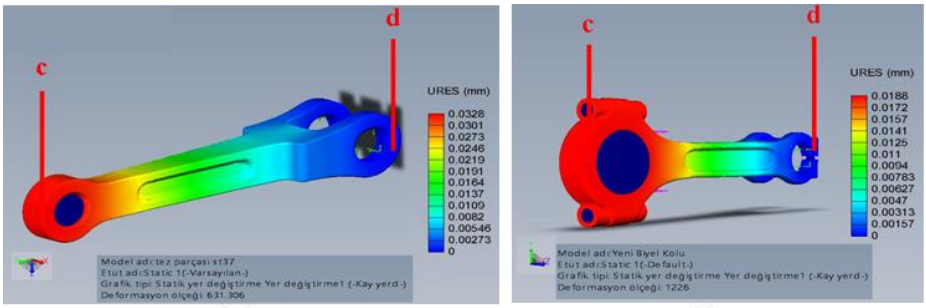
Commer TS3 dizel motorunda kullanılan ve DIN St37-2 çeliğinden imal edilmesi düşünülen orijinal ve tasarlanan Y-şekilli biyel kollarının sanal çekme sonucu meydana gelen birim şekil değiştirme analizleri yapılmış ve sonuçları karşılaştırılmıştır.

Statik yük altında yapılan çekme analizinde hem orijinal hem de tasarlanan Y-şekilli biyel kollarının ayak kısmının ucundaki şekil değiştirme değeri "d" harfiyle gösterilmiştir. Biyel başı ucundaki şekil değiştirme değeri ise "c" harfiyle simgelenmiştir (Şekil 11 ve 12).

Şekil 11 (a)'da Commer TS3 dizel motorunda kullanılan orijinal ve Şekil 11 (b)'de tasarlanan biyel kollarının Y-şekilli ayak kısmındaki tek yuva deliğinden statik yük uygulanarak gerçekleştirilen sanal çekme deneyi sonucunda oluşan şekil değiştirme değerleri gösterilmektedir. Şekil 11 (a)'da görüldüğü gibi, biyel başındaki (c noktası) şekil değiştirme değeri 0.0328 mm olup, biyelin diğer kısımlarındaki şekil değiştirme miktarlarından daha yüksektir. Biyel kolunun hiç şekil değiştirmeyen kısmı ise ayak kısmıdır (d noktası). Şekil 11 (b)'de görüldüğü gibi, biyel başındaki (c noktası) şekil değiştirme değeri 0.0188 mm olup, biyelin diğer kısımlarındaki şekil değiştirme miktarlarından daha yüksektir. Tasarlanan biyel kolunun hiç şekil değiştirmeyen kısmı ise ayak kısmıdır (d noktası).

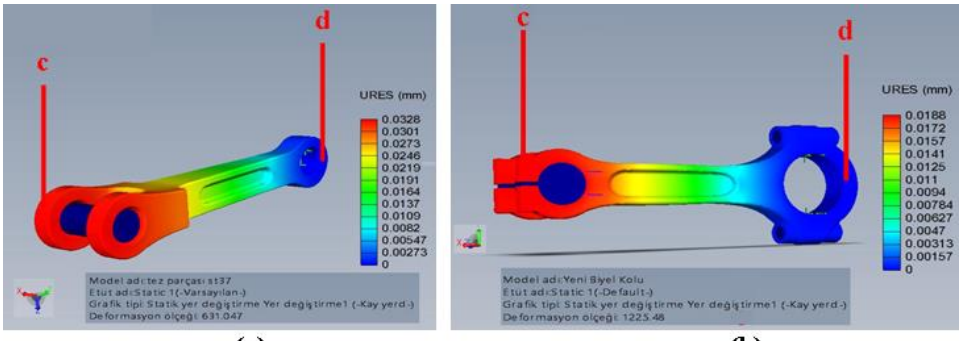
Şekil 12 (a)'da Commer TS3 dizel motorunda kullanılan orijinal ve Şekil 12 (b)'de tasarlanan biyel kollarının Y-şekilli ayak kısmındaki iki yuva deliğinden iki yuva deliğine pim geçirilerek orta kısmından statik yük uygulanarak gerçekleştirilen sanal çekme deneyi sonucunda oluşan şekil değiştirme değerleri göste-

rilmektedir. Şekil 12 (a)'da görüldüğü gibi, biyel başındaki (c noktası) şekil değiştirme değeri 0.0328 mm olup, biyelin diğer kısımlarındaki şekil değiştirme miktarlarından daha yüksektir. Biyel kolunun hiç şekil değiştirmeyen kısmı ise ayak kısmıdır (d noktası). Şekil 12 (b)'de görüldüğü gibi, tasarlanan biyel kolunun baş kısmındaki (c noktası) şekil değiştirme değeri 0.0188 mm olup, biyelin diğer kısımlarındaki şekil değiştirme miktarlarından daha yüksektir. Tasarlanan biyel kolunun hiç şekil değiştirmeyen kısmı ise ayak kısmıdır (d noktası).



(a) **(b)**

Şekil 11. Commer TS3 dizel motorunda kullanılan ve DIN St37-2 çeliğinden imal edilmesi düşünülen (a) orijinal ve (b) tasarlanan biyel kollarının Y-şekilli ayak kısmındaki tek yuva deliğinden statik yük uygulanarak gerçekleştirilen sanal çekme deneyi sonucunda oluşan şekil değiştirme değerleri



(a) **(b)**

Şekil 12. Commer TS3 dizel motorunda kullanılan ve DIN St37-2 çeliğinden imal edilmesi düşünülen (a) orijinal ve (b) tasarlanan biyel kollarının Y-şekilli ayak kısmındaki iki yuva deliğine pim geçirilerek orta kısmından statik yük uygulanarak gerçekleştirilen sanal çekme deneyi sonucunda oluşan şekil değiştirme değerleri

Sonuç olarak, DIN St37-2 çeliğinden imal edilmesi düşünülen orijinal biyel kolunda ve tasarlanan biyel kolunda meydana gelen şekil değiştirme miktarları karşılaştırıldığında, tasarlanan biyel kolunun baş kısmındaki şekil değişiminin daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Dolayısıyla yeni tasarlanan biyel kolunun

geometrik şekli, birim şekil değiştirme açısından orijinal biyel koluna göre daha avantajlı olduğu söylenebilir.

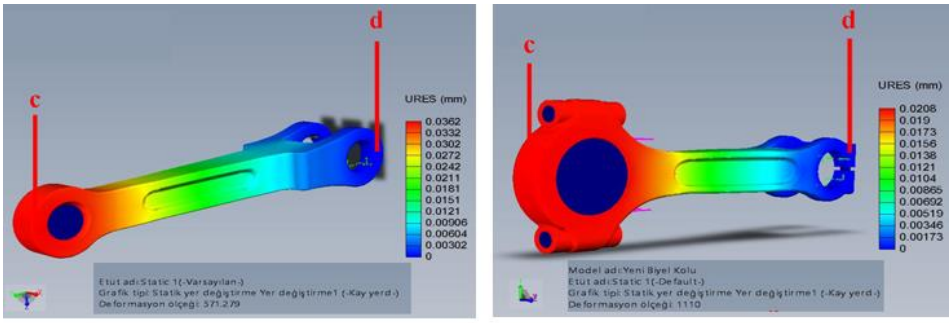
3.2.3 AISI 304 (EN X5CrNi18-10) Paslanmaz Çelik Kullanılarak Tasarlanan Biyel Kolu Modeli

Commer TS3 dizel motorunda kullanılan ve AISI 304 östenitik paslanmaz çelikten imal edilmesi düşünülen orijinal ve tasarlanan Y-şekilli biyel kollarının sanal çekme sonucu meydana gelen birim şekil değiştirme analizleri yapılmış ve sonuçları karşılaştırılmıştır.

Statik yük altında yapılan çekme analizinde hem orijinal hem de tasarlanan Y-şekilli biyel kollarının ayak kısmının ucundaki şekil değiştirme değeri "d" harfiyle gösterilmiştir. Biyel başı ucundaki şekil değiştirme değeri ise "c" harfiyle simgelenmiştir (Şekil 13 ve 14).

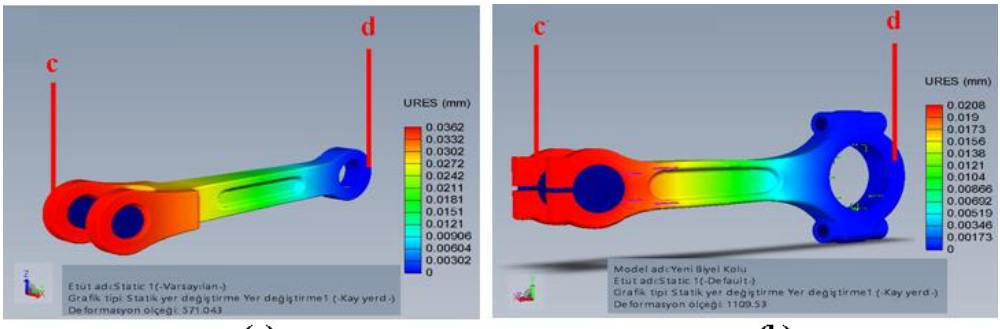
Şekil 13 (a)'da Commer TS3 dizel motorunda kullanılan orijinal ve Şekil 13 (b)'de tasarlanan biyel kollarının Y-şekilli ayak kısmındaki tek yuva deliğinden statik yük uygulanarak gerçekleştirilen sanal çekme deneyi sonucunda oluşan şekil değiştirme değerleri gösterilmektedir. Şekil 13 (a)'da görüldüğü gibi, biyel başındaki (c noktası) şekil değiştirme değeri 0.0362 mm olup, biyelin diğer kısımlarındaki şekil değiştirme miktarlarından daha yüksektir. Biyel kolunun hiç şekil değiştirmeyen kısmı ise ayak kısmıdır (d noktası). Şekil 13 (b)'de görüldüğü gibi, biyel başındaki (c noktası) şekil değiştirme değeri 0.0208 mm olup, biyelin diğer kısımlarındaki şekil değiştirme miktarlarından daha yüksektir. Tasarlanan biyel kolunun hiç şekil değiştirmeyen kısmı ise ayak kısmıdır (d noktası).

Şekil 14 (a)'da Commer TS3 dizel motorunda kullanılan orijinal ve Şekil 14 (b)'de tasarlanan biyel kollarının Y-şekilli ayak kısmındaki iki yuva deliğinden iki yuva deliğine pim geçirilerek orta kısmından statik yük uygulanarak gerçekleştirilen sanal çekme deneyi sonucunda oluşan şekil değiştirme değerleri gösterilmektedir. Şekil 14 (a)'da görüldüğü gibi, biyel başındaki (c noktası) şekil değiştirme değeri 0.0362 mm olup, biyelin diğer kısımlarındaki şekil değiştirme miktarlarından daha yüksektir. Biyel kolunun hiç şekil değiştirmeyen kısmı ise ayak kısmıdır (d noktası). Şekil 14 (b)'de görüldüğü gibi, tasarlanan biyel kolunun baş kısmındaki (c noktası) şekil değiştirme değeri 0.0208 mm olup, biyelin diğer kısımlarındaki şekil değiştirme miktarlarından daha yüksektir. Tasarlanan biyel kolunun hiç şekil değiştirmeyen kısmı ise ayak kısmıdır (d noktası).



(a) **(b)**

Şekil 13. Commer TS3 dizel motorunda kullanılan ve AISI 304 östenitik paslanmaz çelikten imal edilmesi düşünülen (a) orijinal ve (b) tasarlanan biyel kollarının Y-şekilli ayak kısmındaki tek yuva deliğinden statik yük uygulanarak gerçekleştirilen sanal çekme deneyi sonucunda oluşan şekil değiştirme değerleri



(a) **(b)**

Şekil 14. Commer TS3 dizel motorunda kullanılan ve AISI 304 östenitik paslanmaz çelikten imal edilmesi düşünülen (a) orijinal ve (b) tasarlanan biyel kollarının Y-şekilli ayak kısmındaki iki yuva deliğine pim geçirilerek orta kısmından statik yük uygulanarak gerçekleştirilen sanal çekme deneyi sonucunda oluşan şekil değiştirme değerleri

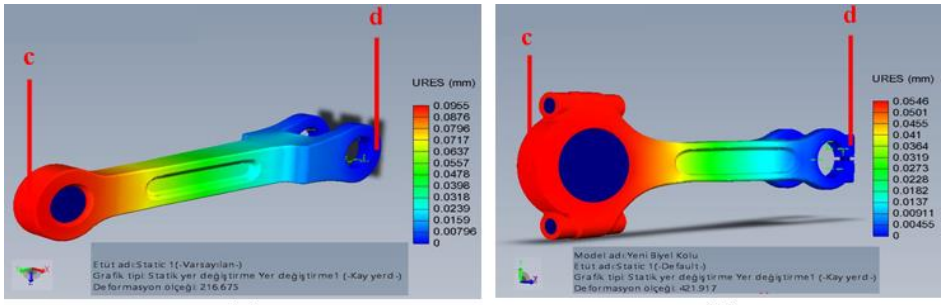
Sonuç olarak, AISI 304 östenitik paslanmaz çelikten imal edilmesi düşünülen orijinal biyel kolunda ve tasarlanan biyel kolunda meydana gelen şekil değiştirme miktarları karşılaştırıldığında, tasarlanan biyel kolunun baş kısmındaki şekil değişiminin daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Dolayısıyla yeni tasarlanan biyel kolunun geometrik şekli, birim şekil değiştirme açısından orijinal biyel koluna göre daha avantajlı olduğu söylenebilir.

3.2.4 AISI AA 7075-O Alüminyum Alaşımı Kullanılarak Tasarlanan Biyel Kolu Modeli

Commer TS3 dizel motorunda kullanılan ve AISI AA 7075-O alüminyum alaşımından imal edilmesi düşünülen orijinal ve tasarlanan Y-şekilli biyel kollarının sanal çekme sonucu meydana gelen birim şekil değiştirme analizleri yapılmış ve sonuçları karşılaştırılmıştır.

Statik yük altında yapılan çekme analizinde hem orijinal hem de tasarlanan Y-şekilli biyel kollarının ayak kısmının ucundaki şekil değiştirme değeri "d" harfiyle gösterilmiştir. Biyel başı ucundaki şekil değiştirme değeri ise "c" harfiyle simgelenmiştir (Şekil 15 ve 16).

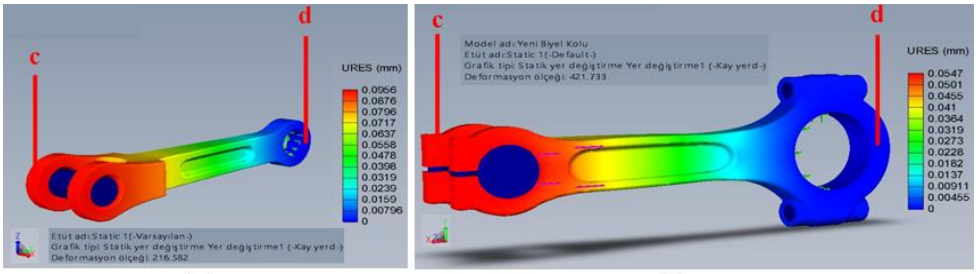
Şekil 15 (a)'da Commer TS3 dizel motorunda kullanılan orijinal ve Şekil 15 (b)'de tasarlanan biyel kollarının Y-şekilli ayak kısmındaki tek yuva deliğinden statik yük uygulanarak gerçekleştirilen sanal çekme deneyi sonucunda oluşan şekil değiştirme değerleri gösterilmektedir. Şekil 15 (a)'da görüldüğü gibi, biyel başındaki (c noktası) şekil değiştirme değeri 0.0955 mm olup, biyelin diğer kısımlarındaki şekil değiştirme miktarlarından daha yüksektir. Biyel kolunun hiç şekil değiştirmeyen kısmı ise ayak kısmıdır (d noktası). Şekil 15 (b)'de görüldüğü gibi, biyel başındaki (c noktası) şekil değiştirme değeri 0.0546 mm olup, biyelin diğer kısımlarındaki şekil değiştirme miktarlarından daha yüksektir. Tasarlanan biyel kolunun hiç şekil değiştirmeyen kısmı ise ayak kısmıdır (d noktası).



(a) **(b)**

Şekil 15. Commer TS3 dizel motorunda kullanılan ve AISI AA 7075-O alüminyum alaşımından imal edilmesi düşünülen (a) orijinal ve (b) tasarlanan biyel kollarının Y-şekilli ayak kısmındaki tek yuva deliğinden statik yük uygulanarak gerçekleştirilen sanal çekme deneyi sonucunda oluşan şekil değiştirme değerleri

Şekil 16 (a)'da Commer TS3 dizel motorunda kullanılan orijinal ve Şekil 16 (b)'de tasarlanan biyel kollarının Y-şekilli ayak kısmındaki iki yuva deliğinden iki yuva deliğine pim geçirilerek orta kısmından statik yük uygulanarak gerçekleştirilen sanal çekme deneyi sonucunda oluşan şekil değiştirme değerleri gösterilmektedir. Şekil 16 (a)'da görüldüğü gibi, biyel başındaki (c noktası) şekil değiştirme değeri 0.0956 mm olup, biyelin diğer kısımlarındaki şekil değiştirme miktarlarından daha yüksektir. Biyel kolunun hiç şekil değiştirmeyen kısmı ise ayak kısmıdır (d noktası). Şekil 16 (b)'de görüldüğü gibi, tasarlanan biyel kolunun baş kısmındaki (c noktası) şekil değiştirme değeri 0.0547 mm olup, biyelin diğer kısımlarındaki şekil değiştirme miktarlarından daha yüksektir. Tasarlanan biyel kolunun hiç şekil değiştirmeyen kısmı ise ayak kısmıdır (d noktası).



(a) **(b)**

Şekil 16. Commer TS3 dizel motorunda kullanılan ve AISI AA 7075-O alüminyum alaşımından imal edilmesi düşünülen (a) orijinal ve (b) tasarlanan biyel kollarının Y-şekilli ayak kısmındaki iki yuva deliğine pim geçirilerek orta kısmından statik yük uygulanarak gerçekleştirilen sanal çekme deneyi sonucunda oluşan şekil değiştirme değerleri

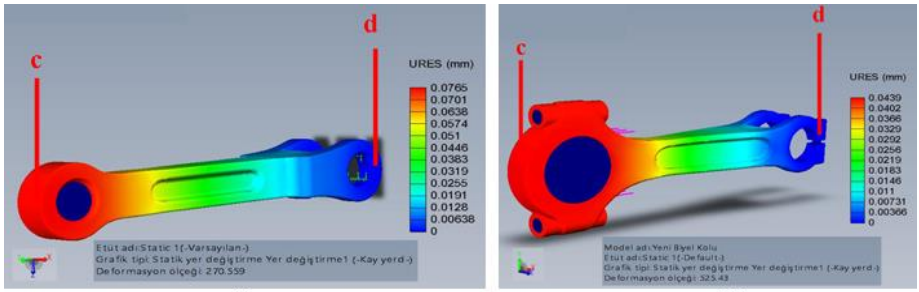
Sonuç olarak, AISI AA 7075-O alüminyum alaşımından imal edilmesi düşünülen orijinal biyel kolunda ve tasarlanan biyel kolunda meydana gelen şekil değiştirme miktarları karşılaştırıldığında, tasarlanan biyel kolunun baş kısmındaki şekil değişiminin daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Dolayısıyla yeni tasarlanan biyel kolunun geometrik şekli, birim şekil değiştirme açısından orijinal biyel koluna göre daha avantajlı olduğu söylenebilir.

3.2.5 EN CuZn37 Alaşımı Kullanılarak Tasarlanan Biyel Kolu Modeli

Commer TS3 dizel motorunda kullanılan EN CuZn37 alaşımından imal edilmesi düşünülen orijinal ve tasarlanan Y-şekilli biyel kollarının sanal çekme sonucu meydana gelen birim şekil değiştirme analizleri yapılmış ve sonuçları karşılaştırılmıştır.

Statik yük altında yapılan çekme analizinde hem orijinal hem de tasarlanan Y-şekilli biyel kollarının ayak kısmının ucundaki şekil değiştirme değeri "d" harfiyle gösterilmiştir. Biyel başı ucundaki şekil değiştirme değeri ise "c" harfiyle simgelenmiştir (Şekil 17 ve 18).

Şekil 17 (a)'da Commer TS3 dizel motorunda kullanılan orijinal ve Şekil 17 (b)'de tasarlanan biyel kollarının Y-şekilli ayak kısmındaki tek yuva deliğinden statik yük uygulanarak gerçekleştirilen sanal çekme deneyi sonucunda oluşan şekil değiştirme değerleri gösterilmektedir. Şekil 17 (a)'da görüldüğü gibi, biyel başındaki (c noktası) şekil değiştirme değeri 0.0765 mm olup, biyelin diğer kısımlarındaki şekil değiştirme miktarlarından daha yüksektir. Biyel kolunun hiç şekil değiştirmeyen kısmı ise ayak kısmıdır (d noktası). Şekil 17 (b)'de görüldüğü gibi, biyel başındaki (c noktası) şekil değiştirme değeri 0.0439 mm olup, biyelin diğer kısımlarındaki şekil değiştirme miktarlarından daha yüksektir. Tasarlanan biyel kolunun hiç şekil değiştirmeyen kısmı ise ayak kısmıdır (d noktası).

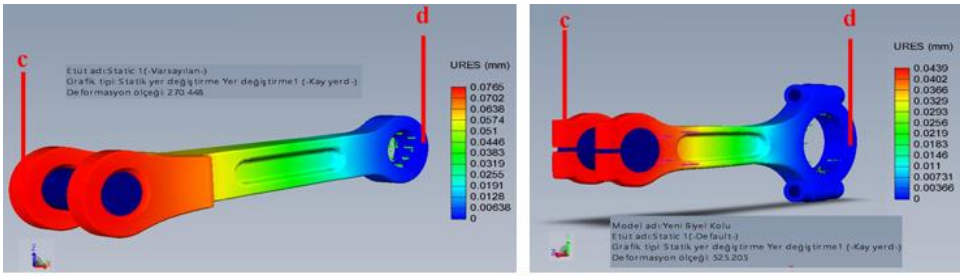


(a) **(b)**

Şekil 17. Commer TS3 dizel motorunda kullanılan ve EN CuZn37 alaşımından imal edilmesi düşünülen (a) orijinal ve (b) tasarlanan biyel kollarının Y-şekilli ayak kısmındaki tek yuva deliğinden statik yük uygulanarak gerçekleştirilen sanal çekme deneyi sonucunda oluşan şekil değiştirme değerleri

Şekil 18 (a)'da Commer TS3 dizel motorunda kullanılan orijinal ve Şekil 18 (b)'de tasarlanan biyel kollarının Y-şekilli ayak kısmındaki iki yuva deliğinden iki yuva deliğine pim geçirilerek orta kısmından statik yük uygulanarak gerçekleştirilen sanal çekme deneyi sonucunda oluşan şekil değiştirme değerleri gösterilmektedir. Şekil 18 (a)'da görüldüğü gibi, biyel başındaki (c noktası) şekil değiştirme değeri 0.0765 mm olup, biyelin diğer kısımlarındaki şekil değiştirme miktarlarından daha yüksektir. Biyel kolunun hiç şekil değiştirmeyen kısmı ise ayak kısmıdır (d noktası). Şekil 18 (b)'de görüldüğü gibi, tasarlanan biyel kolunun baş kısmındaki (c noktası) şekil değiştirme değeri 0.0439 mm olup, biyelin diğer kısımlarındaki şekil değiştirme miktarlarından daha yüksektir. Tasarlanan biyel kolunun hiç şekil değiştirmeyen kısmı ise ayak kısmıdır (d noktası).

Sonuç olarak, EN CuZn37 alaşımından imal edilmesi düşünülen orijinal biyel kolunda ve tasarlanan biyel kolunda meydana gelen şekil değiştirme miktarları karşılaştırıldığında, tasarlanan biyel kolunun baş kısmındaki şekil değişiminin daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Dolayısıyla yeni tasarlanan biyel kolunun geometrik şekli, birim şekil değiştirme açısından orijinal biyel koluna göre daha avantajlı olduğu söylenebilir.



(a) (b)

Şekil 18. Commer TS3 dizel motorunda kullanılan ve EN CuZn37 alaşımından imal edilmesi düşünülen (a) orijinal ve (b) tasarlanan biyel kollarının Y-şekilli ayak kısmındaki iki yuva deliğine pim geçirilerek orta kısmından statik yük uygulanarak gerçekleştirilen sanal çekme deneyi sonucunda oluşan şekil değiştirme değerleri

4. GENEL SONUÇLAR

"Commer TS3" dizel motorunda kullanılan orijinal Y-şekilli biyel kolundan daha verimli ve maliyeti daha düşük olacağı düşünülen geometrik olarak yeni bir biyel kolu tasarımı yapılmıştır. Orijinal ve tasarlanan biyel kollarına statik yük uygulandığında Von-Mises gerilim dağılımlarının nasıl değiştiğini gösteren analizler yapılmıştır. Yapılan sanal çekme anlizleri sonucunda, orijinal biyel kolunda ve tasarlanan biyel kolunda meydana gelen Von-Mises gerilim dağılımları değerlendirildiğinde, tasarlanan biyel kolundaki Von-Mises gerilim dağılımlarının daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle yeni tasarlanan biyel kolunun, orijinal biyel koluna göre daha verimli olabileceği sonucuna varılmıştır.

Orijinal ve tasarlanan Y-şekilli biyel kollarının imalatında hangi malzemenin en yüksek performası sağlayabileceğini belirlemek amacıyla "Solidworks Simulation" uygulaması ile sonlu elemanlar analizi yapılmıştır. Yapılan sanal çekme anlizleri sonucunda, Commer TS3 dizel moturunda kullanılan Y-şekilli orijinal biyel kolunun maruz kalacağı en yüksek gerilme değeri, 105 MPa cıvarında ve tasarlanan biyel kolunun ise 83 MPa cıvarında olduğu tespit edilmiştir. Emniyet katsayısı olarak 2 alındığıda, orijinal biyel kolu malzemesi için akma mukavemeti en az 210 MPa ve tasarlanan biyel kolu için ise akma mukavemeti en az 166 MPa olan bir malzemeye gereksinim duyulacaktır.

Birim şekil değişimi analizlerinden elde edilen sonuçlara göre orijinal biyel kolunun en yüksek uzama değeri 0.0326 mm ve tasarlanan biyel kolunun ise en yüksek 0.0188 mm olarak tespit edilmiştir.

Gerek gerilim dağılımı gerek birim şekil değişimi ile ilgili analizlerin sonucunda "Commer TS3" dizel motorlarında kullanılabilecek biyel kolllarının bu çalışma kapsamında analizi yapılan malzemeler arasında en uygun olan malzemelerin AISI 1020 (EN C22) ve DIN St 37-2 (EN S235JR) çelikleri olduğu görülmektedir (çeliklerin mekanik özellikleri için Tablo 2'ye bakınız).

5. Kaynakça

[1] Ekici, H. N. (2019). Design and manufacturing of a connecting rod for gasoline engines made by high performance plastic (Doctoral thesis). Marmara University, Istanbul, Türkiye.

[2] Turgaç, A. T. (2020). İçten yanmalı motorlarda biyel kolu cıvatalarının hesabına ve tasarımına yönelik yazılım geliştirme (Master's thesis). Istanbul Technical University, Istanbul, Türkiye.

[3] Acar, H. (2016). Biyel kolu analizi, optimizasyonu ve yorulma davranışının incelenmesi (Master's thesis). Bursa Technical University, Bursa, Türkiye.

[4] Şahin, O. U. (2015). Motor biyel parçasının parametrik tasarımı ve bilgisayar destekli programlar ile geliştirilmesi (Master's thesis). Istanbul Technical University, Istanbul, Türkiye.

[5] Sayrugaç, A. (2019). Bir dizel motorunda farklı basınçlar altında kullanılan biyel kolunun tasarımı ve analizi (Master's thesis). Selçuk University, Konya, Türkiye.

[6] Bayram, M. (2015). Bir ağır ticari araç motoru biyel kolunun büyük uç kırma parametreleri optimizasyonu (Master's thesis). Istanbul Technical University, Istanbul, Türkiye.

[7] Budak, S. (2022). Farklı Malzemelerle Biyel Kolunun Deformasyon ve Gerilme Analizi. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, (37), 12-16.

[8] Godara, S. S., Brenia, V., Soni, A. K., Shekhawat, R. S., & Saxena, K. K. (2022). Design & analysis of connecting rod using ANSYS software. Materials Today: Proceedings, 56, 1896-1903.

[9] https://en.wikipedia.org/wiki/Commer_TS3

[10] Liu, Y., Zhang, F., Zhao, Z., Cui, T., Zuo, Z., Zhang, S., (2017). The Effects of Pressure Difference on Opposed Piston Two Stroke Diesel Engine Scavenging. Process 9th International Conference on Applied Energy, ICAE2017, 21-24 August 2017, Cardiff, UK, Energy Procedia 142, p. 1172–1178.

[11] Mohammed, S. E., Baharom, M., Abdul Aziz, A. R., (2014). Comparative Analysis of Two Proposed Models of Connecting rods for Crank-rocker Engines Using Finite Element Method. MATEC Web of Conferences 13, 02019.

[12] https://www.genelcelik.com.tr/tr/teknik-bilgiler/genel-yapi-celikleri/11

[13] https://eurocodeapplied.com/design/en1993/steel-design-properties

[14]https://www.matweb.com/search/datasheet_print.aspx?matguid=bd20a4281ae3430d97cfbebf6904ec50

[15] https://www.seykoc.com.tr/icerik/7075?dil=tr

[16] https://tr.ozmetal.com/Urunler/PirincSerit

[17] Özdemir, A. (2006). Seramik malzemelerin kırılma tokluğu değerlerinin üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi ile teorik olarak belirlenmesi (Master's thesis). Dokuz Eylül University, İzmir, Türkiye.

BÖLÜM 27

Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Kompozit Malzeme Tasarımında Deneysel ve Simülasyon Süreçlerini Kısaltabilecek Farklı Bir Yaklaşım ve Bir Uygulama

Mehmet Çalışkan [1]

[1] Prof. Dr., Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü , ORCID ID: 0000-0002-7835-9414

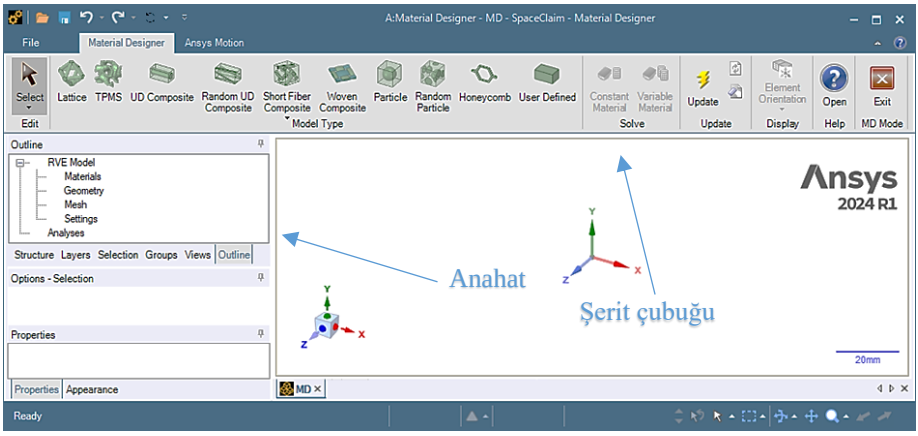
1. Giriş

Karmaşık bir mikro yapıya sahip bir parçayı simüle etmek zorlu bir süreçtir. Kompozit malzemelerin tasarımı ister elyaf takviyeli ister parçacık takviyeli olsun, bu problemlere tipik bir örnektir. Bal peteği yapıları veya kafes yapıları gibi mikroyapıya sahip metamalzemeler de diğer birçok kategoriyle birlikte bu kategoriye girer. Bu tür parçaları "Sonlu Elemanlar Analizi" kullanarak simüle etmek, genellikle tam özelliklerini belirlemek için üretilmiş numuneler üzerinde deneysel testler yapmayı gerektirir ki bu da pahalı ve zaman alıcı bir süreçtir. İşte bu noktada Ansys "Malzeme Tasarımcısı" (Material Designer), maliyetli deneysel testlerin yerini almaya aday güçlü bir araçtır. Programın algoritmaları homojen yapıdaki bir malzemenin özelliklerini, temel malzemelerinin bilinen özelliklerini kullanarak hesaplayabilir. Sadece kompozitlerin ötesinde, çok çeşitli metamalzemelerle başa çıkabilir. Ve homojenleştirilmiş özellikleri hesaplamaktan daha fazlasını yapar. Ayrıca, tasarlanan mikro yapıyı parametrik hale getirebilir ve böylece yürütülen uygulamalar için hangi malzeme özelliği kombinasyonunun en uygun olduğu belirlenebilir. Material Designer'in faydası, katmanlı üretim alanında da açıkça görülmektedir. Bu araçla, kafes yapılardan oluşan homojenleştirilmiş malzemeler üretilebilir ve fiziksel testlerin zaman ve masrafı olmadan bu yapılar hızlı ve verimli bir şekilde optimize edilebilir. Bu yeteneklerine ek olarak Material Designer, doğrusal olmayan malzemelerin mikroyapıları için gerilim-gerinim (σ-ε) eğrilerini de hesaplayabilir [1].

2. Tasarım Araçları ve Süreci

Ansys Material Designer, çok çeşitli karmaşık mikro yapıları tasarlamak ve analiz etmek için etkili araçlar sağlar. Modül, Ansys Workbench ortamında tek bir sistem olarak veya daha büyük bir analizin iş akışının alt parçası olarak sorunsuz bir şekilde çalışabilir. Material Designer Modülü, "Çalışma Tezgâhı" ndaki (Workbench) araçlar kutusu (Toolbox) menüsünden "Proje Şeması" na (Project Schematic) sürüklenip bırakılır. Malzemelerin temel özelliklerini girmek için proje modülündeki "Mühendislik Verileri" (Engineering Data) hücresine çift tıklamak yeterlidir. Material Designer hücresine tıklanarak malzemeyi tanımlamak için Material Designer kullanıcı ara yüzü (Graphical User Interface – GUI) açılır ve bu kapsamdaki tüm araçlara erişilir (Şekil1). Bu ortamda istenen geometri seçilebilir, ana ve bileşen malzemeleri atanabilir ve analiz ayarları seçilebilir. Material Designer daha sonra yeni homojenize edilmiş malzemenin özelliklerini hesaplayabilecektir. Workbench Project Schematic ara yüzüne geri dönerek, sonuçları daha fazla simülasyon için sonraki sistemlerin Engineering Data

hücrelerine aktarmak mümkündür. Üzerinde çalışılan proje kompozit malzemeler içeriyorsa, sonuçlar katman tasarımı için Ansys Composite PrepPost'a aktarılabilir. Daha sonra, Ansys Mechanical ara yüzünde yapılan makro ölçekteki tasarımlar Material Designer ile geliştirilen malzemeler atanarak gerilme testlerine tabi tutulabilir. Malzemelerin tasarımından nihai üretim planına kadar tüm bir proje tek bir Workbench Project Schematic içinde tamamlanabilir. Material Designer tek bir Workbench sisteminde kullanılsa ya da yetenekleri daha büyük bir Workbench projesine entegre edilse bile, karmaşık mikro yapıları tasarlama ve simüle etme işine önemli bir verimlilik getirir.



Şekil 19.Material Designer kullanıcı ara yüzü (GUI).

3. İşlem ana hattı

Material Designer anahattı (Outline), homojenleştirilmiş bir malzemeyi hesaplamak için gereken girdi özelliklerini görüntüler. Anahattaki öğeler, şerit çubuğunda (Ribbon bar) bulunan araçlara karşılık gelir (Şekil1). Her girişin içerik menüsü daha ayrıntılı seçenekler sunar. Durum simgesi, bir öğenin güncel mi (✔) yoksa güncellenmesi mi gerektiğini (⚡) belirtir. Örneğin, Temsili Hacim Elemanı (RVE - Representative Volume Element) modeli için aşağıdaki öğeler anahatta görüntülenir:

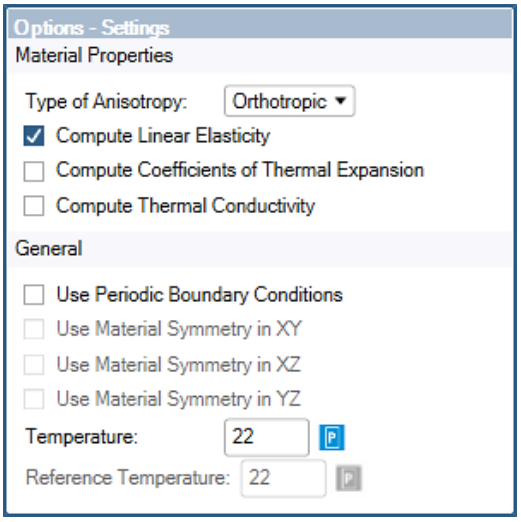
- Malzemeler (Materials): Modelinizi oluşturan malzemeler tanımlanır.
- Geometri (Geometry): RVE geometrisi tanımlanır.
- Çözüm ağı (Mesh): Model için ağ ayarları tanımlanır.
- Ayarlar (Settings): Model için analiz ayarları tanımlanır.

• Deneysel veriler (Experimental data): Yalnızca kısa elyaf (short fiber) modelleri için ek bir girdi öğesidir.

• Analizler (Analyses): Bu kısımdaki öğeler seçilen analizlere bağlı olarak değişiklik gösterir.

4. Seçenekler paneli

Seçenekler paneli (Options), anahat'taki seçime göre değişir ve homojenizasyon analizi için hangi giriş parametrelerinin gerekli olduğunu gösterir (Şekil 2).

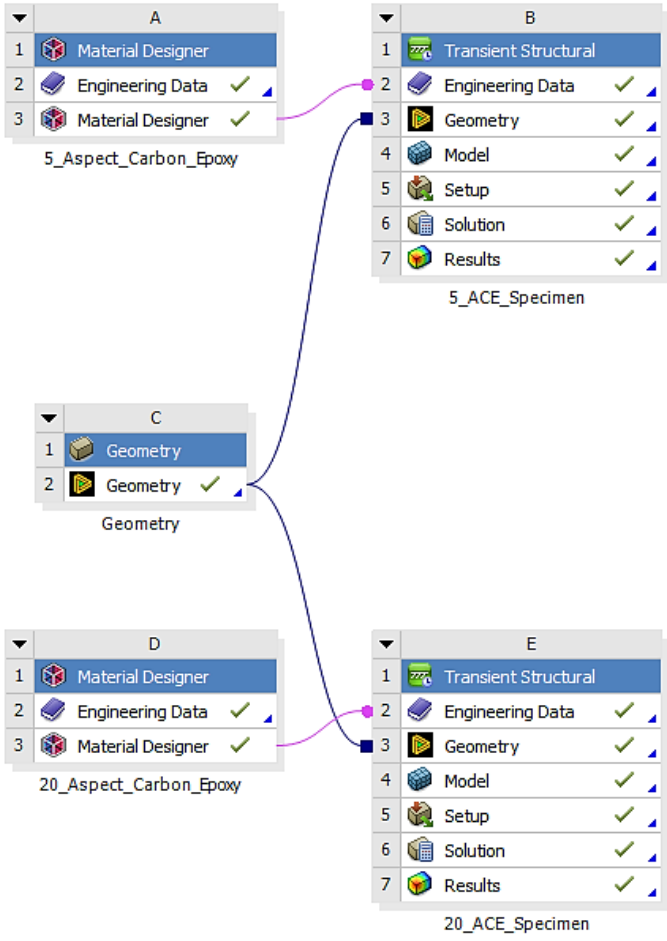


Şekil 20. Seçenekler paneli.

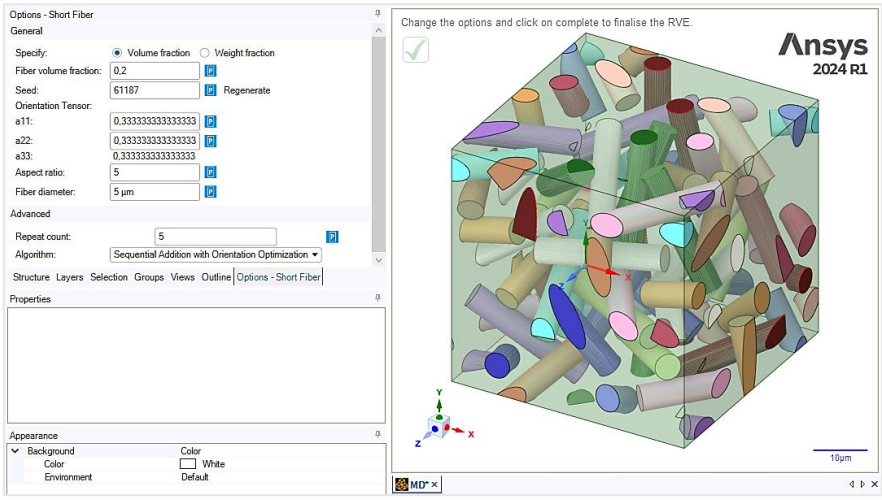
5. Uygulama

5.1. Material Designer Analizleri

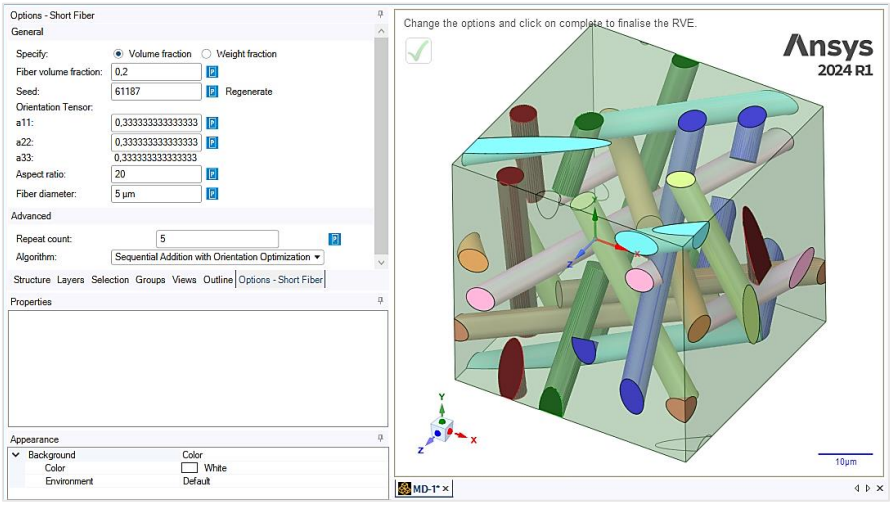
Uygulamanın Ansys Workbench proje akış şeması şekil 3'te görülmektedir. Çalışmada karbon elyaf katkılı epoksi kategorisinden bir kompozit malzeme tasarlamaya karar verilmiştir. Farklı parametrelerin tasarıma yaptığı etkileri gözlemlemek amacıyla, geometri parametrelerinden Aspect ratio (en boy oranı) değiştirilerek 5 ve 20 Aspect oranında, $125x10^3$ μm^3 birim hacimli iki farklı mikro malzeme yapısı tanımlanmıştır (Şekil 4 ve 5).



Şekil 21. Uygulamanın Ansys Workbench proje akış şeması.



Şekil 22. Carbon Epoxy 5 Aspect Ratio mikroyapı.



Şekil 23. Carbon Epoxy 20 Aspect Ratio mikroyapı.

Bu kompozit malzemelerin her ikisinde de ana yapı malzemesi (matrix) olarak epoksi reçinesi (Ansys Engineering Data adı: Resin Epoxy), elyaf malzemesi olarak ise karbon fiber (Ansys Engineering Data adı: Carbon Fiber – 209 GPa) seçilmiştir. Material designer uygulamasında, şekil 1 de görülen Outline prosesi akışı ile yürütülen sonlu elemanlar analizleri sonucunda söz konusu kompozit malzemelerin mekanik özelliklerine ilişkin şekil 6 ve 7'deki sonuçlar elde edilmiştir.

Name	Value	Unit	P
Engineering Constants			
E1	6305,5	MPa	☐
E2	6501,4	MPa	☐
E3	6235,9	MPa	☐
G12	2292,8	MPa	☐
G23	2280,2	MPa	☐
G31	2391,6	MPa	☐
nu12	0,30654		☐
nu13	0,33231		☐
nu23	0,32327		☐
Density			
rho	1,2891E-09	t mm^-3	☐
Logs			
RVE log			
Solver logs			

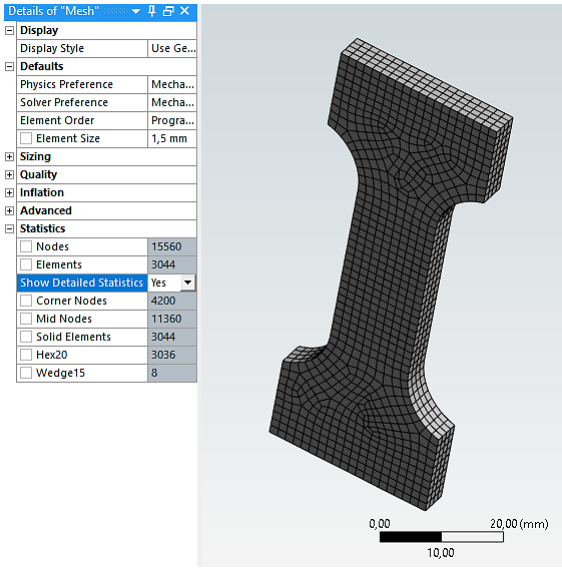
Şekil 24. 5 Aspect ratio Carbon_Epoxy mekanik özellikleri. E>Elastik Modül, G>Kayma Modülü ve nu>Poisson oranıdır.

Name	Value	Unit	P
Engineering Constants			
E1	5422,4	MPa	☐
E2	8549,3	MPa	☐
E3	5486,6	MPa	☐
G12	1894,1	MPa	☐
G23	2427,4	MPa	☐
G31	2934,1	MPa	☐
nu12	0,15155		☐
nu13	0,4759		☐
nu23	0,3729		☐
Density			
rho	1,2424E-09	t mm^-3	☐
Logs			
RVE log			
Solver logs			

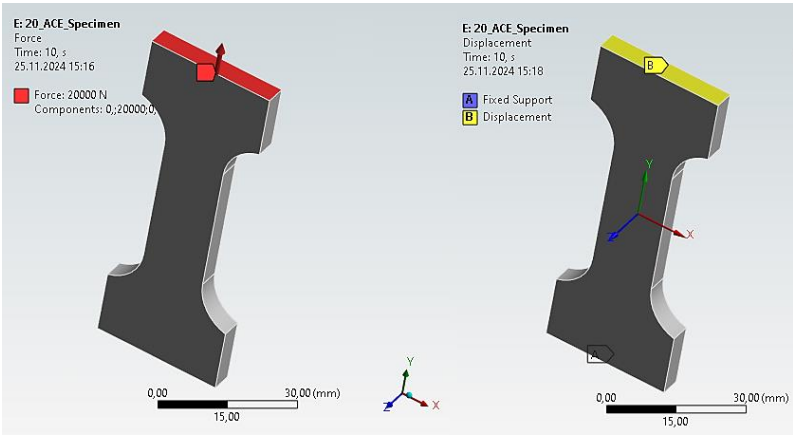
Şekil 25. 20 Aspect ratio Carbon_Epoxy mekanik özellikleri. E>Elastik Modül, G>Kayma Modülü ve nu>Poisson oranıdır.

5.2. Mechanical Analizleri

Bundan sonraki adım, makro geometrinin belirlenmesidir. Bu aşamada, sanal olarak üretilen kompozit malzemenin tek eksenli çekme deneyi performansını gözlemlemek amacıyla Solidworks [2] ile bir deney numunesi CAD (Computer Aided Design – Bilgisayar Destekli Tasarım) modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan model Workbench'e aktarılarak Ansys Transient Mechanical uygulamalarında kullanılmıştır [3]. Mechanical arayüzünde oluşturulan mesh (çözüm ağı), yük ve sınır koşulları sırasıyla şekil 8 ve 9 da görülmektedir.

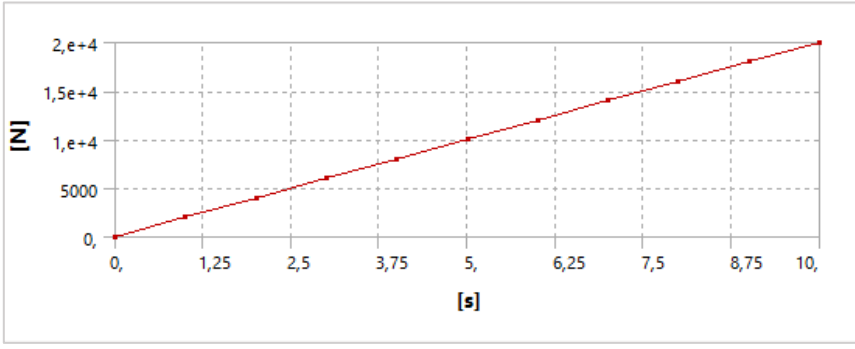


Şekil 26. 3036 sı hexahedral, 8 i wedge olmak üzere toplam 3044 elemandan oluşan sonlu elemanlar modeli.



Şekil 27. Çekme deneyi yük ve sınır koşulları.

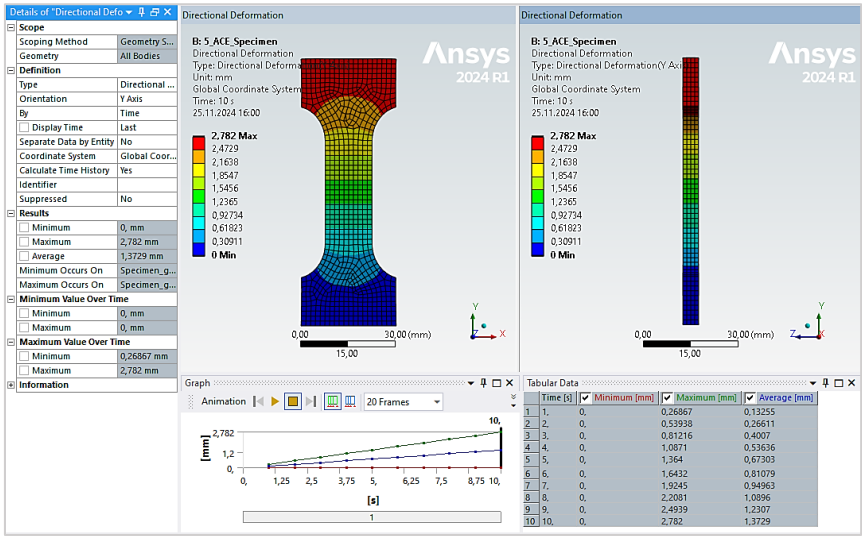
Çekme yükü fonksiyonu ise şekil 10 da görülmektedir. Buna göre, her iki numune için 10s lik analiz süresi boyunca düzgün doğrusal artan, malzemenin elastik sınırını geçmeyeceği tahmin edilen tek bir yük profili tanımlanmıştır. Burada amaç, kopmayı değil mühendislik performansını gözlemlemektir.



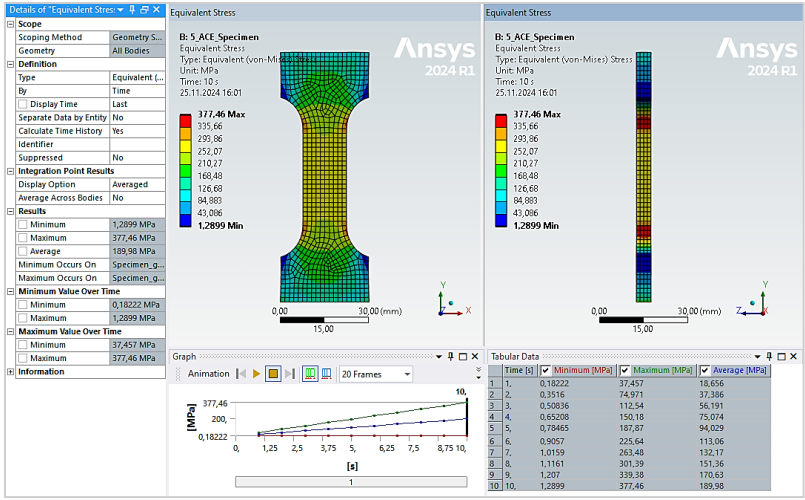
Şekil 28. Çekme deneyi yük-zaman grafiği.

Çekme deneyi simülasyon sonuçları aşağıdaki gibidir:

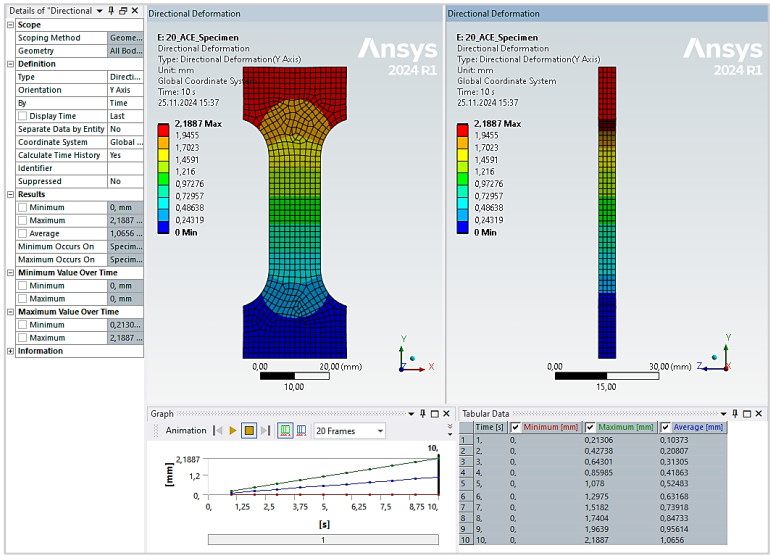
5 Aspect ratio numune için uzama (deformation – ε) ve eşdeğer gerilme (Von Mises) dağılımları şekil 11 ve 12 de görülmektedir. 20 Aspect ratio numune için uzama (deformation – ε) ve eşdeğer gerilme (Von Mises) dağılımları şekil 13 ve 14 de görülmektedir.



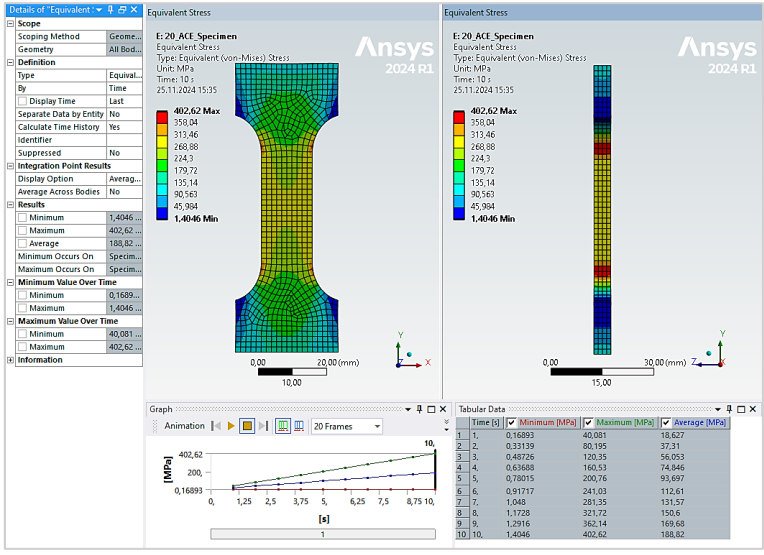
Şekil 29. 5 Aspect ratio numune için uzama (deformation – ε) dağılımı sonucu.



Şekil 30. 5 Aspect ratio numune için eşdeğer gerilme (Von Mises) dağılımı sonucu

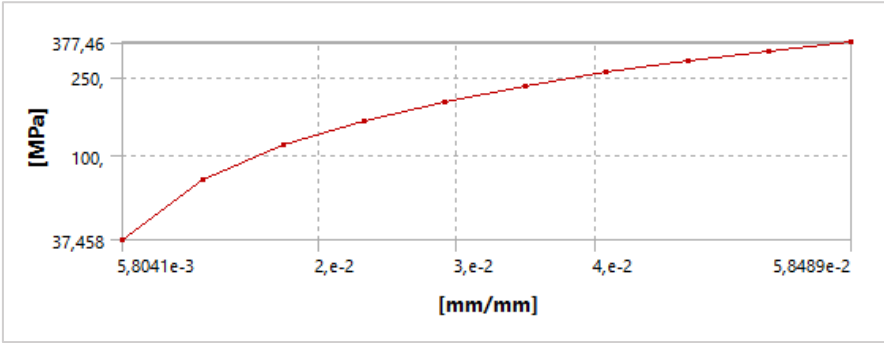


Şekil 31. 20 Aspect ratio numune için uzama (deformation – ε) dağılımı sonucu.

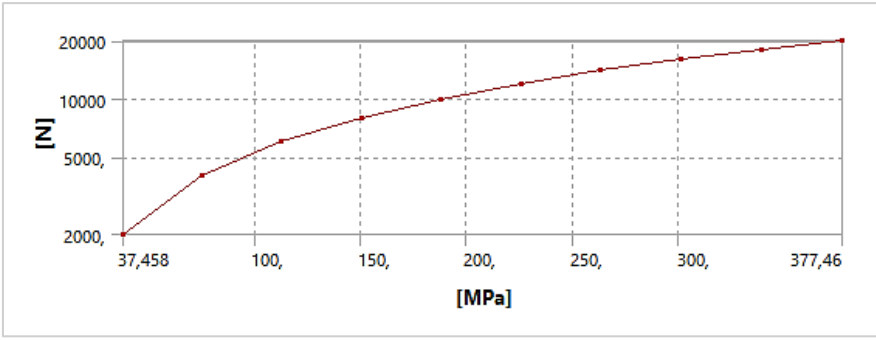


Şekil 32. 20 Aspect ratio numune için eşdeğer gerilme (Von Mises) dağılımı sonucu.

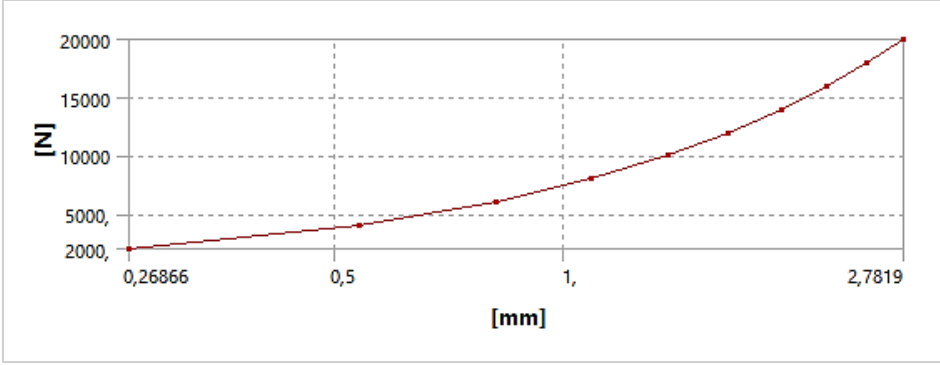
5 Aspect ratio numune için Gerilme – Gerinim (σ-ε) diyagramı şekil'15 de, Çekme kuvveti – Eşdeğer gerilme ilişkisi (F – σ) diyagramı şekil 16'da, Çekme kuvveti – Uzama ilişkisi (F –ε) diyagramı şekil'17 de ve deformasyon enerjisi diyagramı ise şekil'18 de görülmektedir.



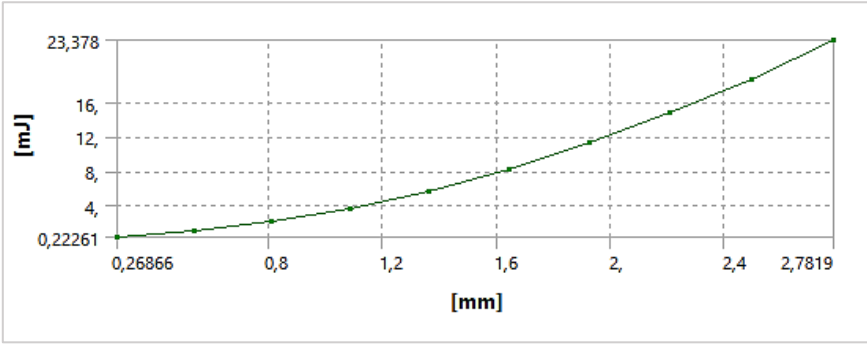
Şekil 33.5 Aspect ratio numune için Gerilme – Gerinim (σ-ε) diyagramı.



Şekil 34. 5 Aspect ratio numune için Çekme kuvveti – Eşdeğer gerilme ilişkisi (F – σ) diyagramı

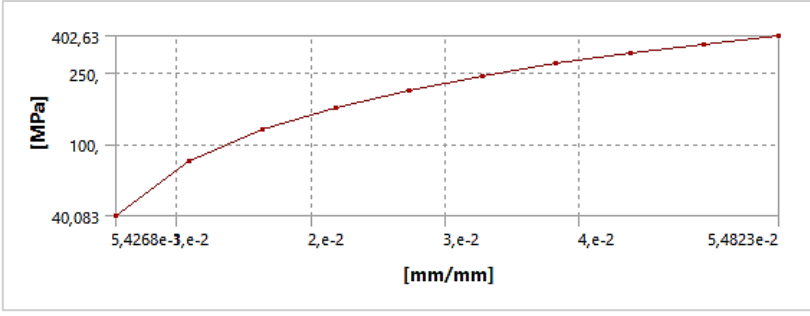


Şekil 35. 5 Aspect ratio numune için Çekme kuvveti – Uzama ilişkisi (F –δ) diyagramı.

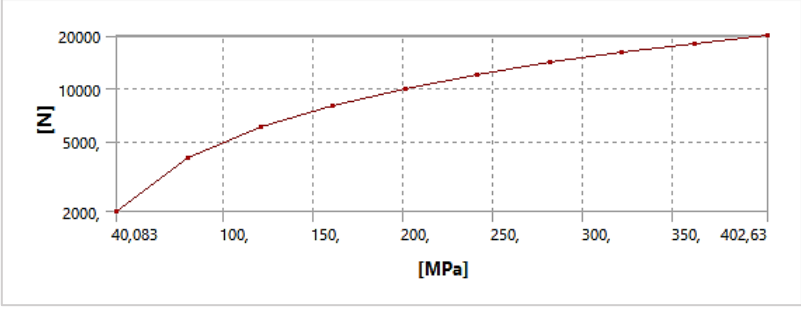


Şekil 36. 5 Aspect ratio numune için deformasyon enerjisi diyagramı.

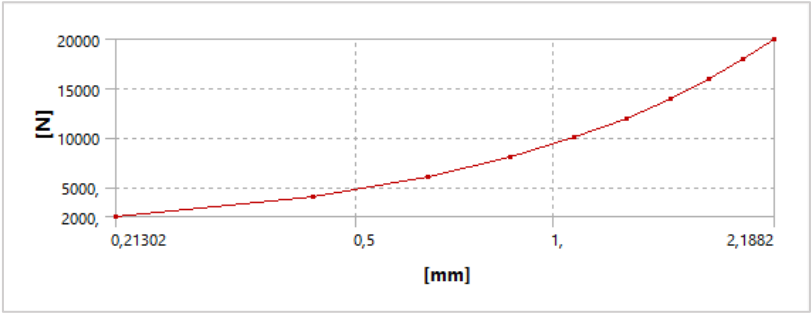
20 Aspect ratio numune için Gerilme – Gerinim (σ-ε) diyagramı şekil 19'da, Çekme kuvveti – Eşdeğer gerilme ilişkisi (F – σ) diyagramı şekil'20 de, Çekme kuvveti – Uzama ilişkisi (F –ε) diyagramı şekil'21 de ve deformasyon enerjisi diyagramı ise şekil'22 de görülmektedir.



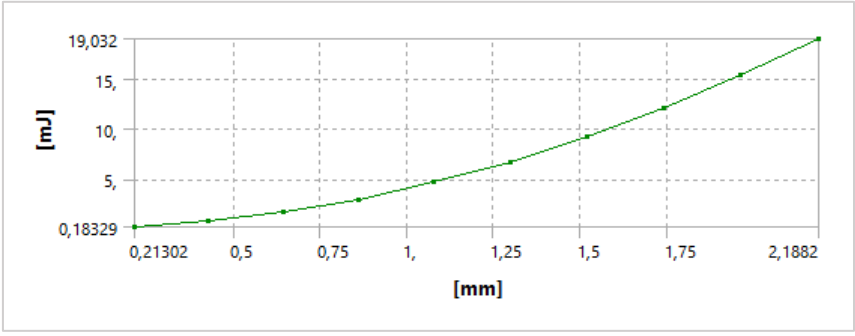
Şekil 37. 20 Aspect ratio numune için Gerilme – Gerinim (σ-ε) diyagramı.



Şekil 38. 20 Aspect ratio numune için Çekme kuvveti – Eşdeğer gerilme ilişkisi (F – σ) diyagramı.



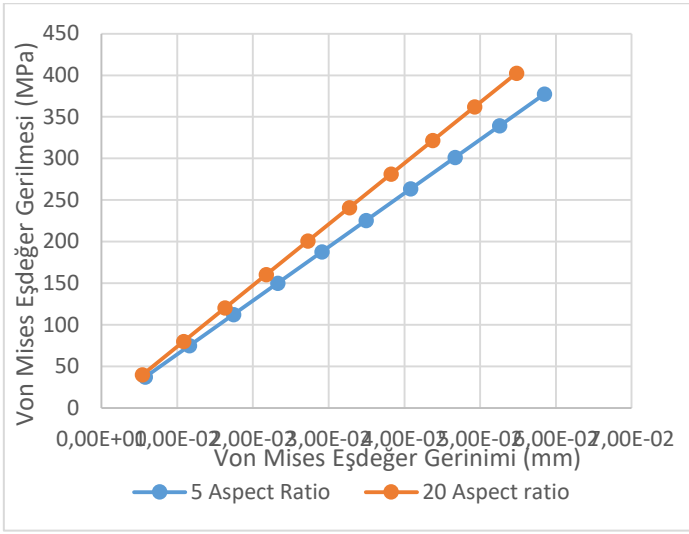
Şekil 39. 20 Aspect ratio numune için Çekme kuvveti – Uzama ilişkisi (F –δ) diyagramı.



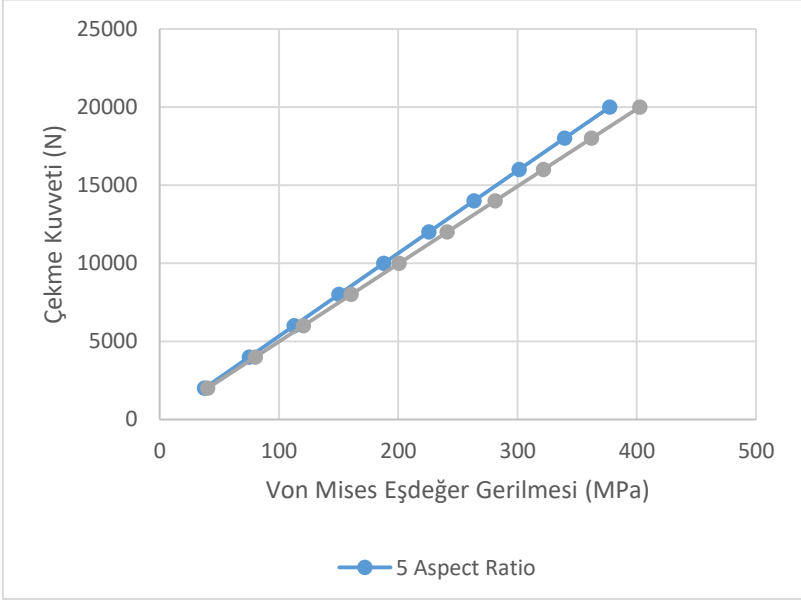
Şekil 40. 20 Aspect ratio numune için deformasyon enerjisi diyagramı.

6. Karşılaştırmalı Sonuçlar

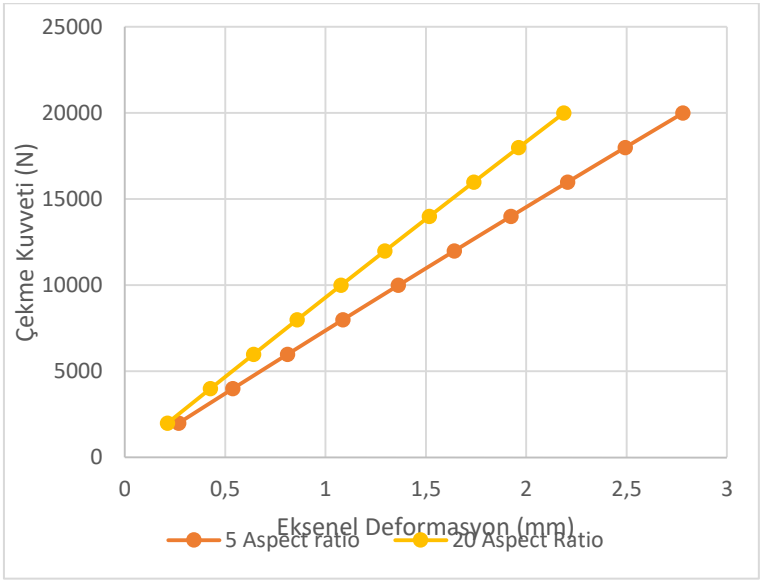
Ansys Workbench arayüzünde Material designer uygulaması yardımıyla tasarlanan karbon elyaf + epoksi kompozit malzemesinin iki farklı elyaf yoğunluğu ile, 5 Aspect ratio ve 20 Aspect ratio özellikli mikroyapı modelleri elde edilmiştir. Daha sonra Solidworks'de makro ölçekte bir çekme deney numunesini tasarlanarak Workbench geometrisi olarak tanımlanmıştır. Bir sonraki adımda numune geometrisi ve malzeme modeli Ansys Mechanical arayüzüne aktarılarak makro yapı sonlu elemanlar modelleri oluşturulmuş ve transient (zamana bağlı) analiz ile çekme deneyi simülasyonları yapılmıştır. 5. Bölümde analiz sonuçları verilmiştir. Bu sonuçların karşılaştırması şekil 23, 24, 25 ve 26 da görülmektedir.



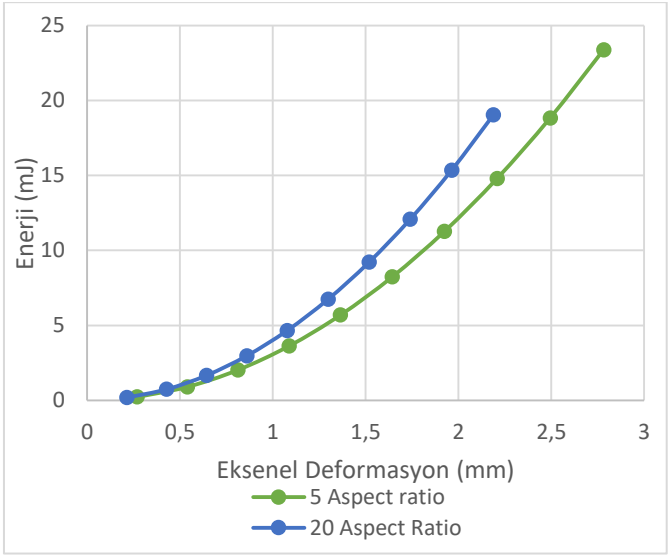
Şekil 41. 5 Aspect ve 20 Aspect ratio numunelerinde Gerilme - Gerinim (σ – ε) değişimi.



Şekil 42. 5 Aspect ve 20 Aspect ratio numunelerinde Çekme kuvveti - Gerilme (F – σ) değişimi.



Şekil 43. 5 Aspect ve 20 Aspect ratio numunelerinde Çekme kuvveti - Deformasyon (F – δ) değişimi.



Şekil 44. 5 Aspect ve 20 Aspect ratio numunelerinde Enerji - Deformasyon (E –δ) değişimi.

Ansys Mechanical arayüzünde yapılan sonlu elemanlar simülasyonları sonucu elde edilen ve 23, 24, 25 ve 26. şekillerde sunulan, farklı geometrili elyaf (fiber) bileşenleri ile takviye edilmiş epoksi reçinesi ana yapılı kompozit malzemelerin mekanik özellikleri incelendiğinde; genel olarak iki farklı malzemenin davranışlarındaki beklenen farklılıkların sonuçlara yansıdığı gözlemlenmiştir. Şekil 23'de, aynı yük adımlarında 5 aspect numunesinin 20 aspecte göre daha yüksek gerinimler ve daha düşük gerilmeler ürettiği gözlenmiştir. Şekil 24'de, aynı yük adımlarında 20 aspect numunenin 5 aspecte göre daha yüksek gerilmeler ürettiği gözlenmiştir. Şekil 25'de, aynı yük adımlarında 5 aspect numunesinde 20 aspecte göre daha yüksek elastik deformasyon oluştuğu gözlenmiştir. Bu sonucun 5 aspect numunesinin elyaf uzunluğunun 20 aspecte göre daha fazla olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Şekil 26'da, ise aynı yük adımlarında 5 aspect numunesinin 20 aspecte göre daha yüksek enerji sönümlediği gözlenmiş olup, bu durumun 5 aspect numunesinin 20 aspecte oranla daha fazla deforme olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Özetle, Ansys Material Designer modülünün malzeme mikroyapı modeli tasarımında deneysel süreçleri kısaltabilecek önemli nümerik analiz imkânları sunduğu gözlemlenmiş ve doğrulanmıştır.

Kaynaklar:

[1]. Material Designer User's Guide, Release 2024 R1, ANSYS, Inc. Southpointe 2600 Ansys Drive Canonsburg, PA 15317 ANSYS, Inc. And ansy-sinfo@ansys.com.

[2]. SOLIDWORKS 2024 is © 1995 - 2024 Dassault Systemes SolidWorks Corp.

[3]. Mechanical User's Guide, Release 2024 R1, ANSYS, Inc. Southpointe 2600 Ansys Drive Canonsburg, PA 15317 ANSYS, Inc. And ansy-sinfo@ansys.com.

BÖLÜM 28

Vermikompost Üretim Yöntemleri

Hüdaverdi Arslan[1] & Mutlu Yalvaç[2]

[1] Dr. Öğr. Üyesi, Mersin Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümü, ORCID: 0000-0002-3053-6944
[2] Doç. Dr., Mersin Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümü, ORCID: 0000-0002-1281-5712

1. Genel

Bitki artıkları, belediye, hastane ve endüstriyel atıklar gibi biyolojik olarak parçalanabilir organik atıklar bertaraf ve arıtmada büyük sorunlar yaratır. İşlenmemiş hayvan gübrelerinin tarım alanlarında kullanılması, yeraltı suyunu kirleterek halk sağlığı riskine neden olur (Gandhi ve vd., 1997). Solucan gübresi ve kompostlama, çamuru yararlı ürünlere dönüştürmenin en etkili yoludur. Bu iki köklü süreç, katı organik atık geri kazanımı için kullanılan en etkili yoldur ve nihai ürünler olan kompost ve solucan gübresi, toprak iyileştirme için organik madde kaynağı, toprak gübrelemesi için besin kaynağı veya topraksız yetiştirme için yetiştirme ortamı bileşenleri olarak kullanılabilir (Gonzalez ve vd., 2010). Lorimor ve vd., (2001), geleneksel komposta kıyasla vermikompostun atık kütlesinde azalma, işlem süresinde kısalma, elde edilen üründe fitotoksisitenin azalması ile yüksek humus içeriği gibi avantajlara sahip olduğunu bildirmiştir. Solucan gübresi tarımı, çevreye duyarlı atık yönetimi için uygun maliyetli bir araçtır (Banu vd., 2001; Asha vd., 2008). Bu düşük maliyetli teknoloji, atık malzemeleri işlemek için biyo-etken olarak solucanları kullanır (Alidadi, 2005). Birçok araştırmacı, solucan gübresi ile elde edilen çıktılarda parçacık boyutunun küçültüldüğünü ve besin maddelerinin bulunabilirliğinin arttığını bildirmektedir (Ndegwa ve Thompson, 2001). Solucan gübresi, ayrışma sürecini 2-5 kat hızlandırarak atıkların değerli biyo-gübreye dönüşümünü hızlandırır ve termofilik kompostlamaya kıyasla çok daha homojen malzemeler üretir (Bhatnagar ve Palta, 1996; Atiyeh vd., 2000a). Solucanlar organik atık substratlarını parçalar, mikrobiyal aktiviteyi büyük ölçüde uyarır ve mineralizasyon oranlarını artırır. Atıkları komposttan daha ince fakat daha fazla ve çeşitli bir mikrobiyal aktiviteye sahip humus benzeri maddelere hızla dönüşür, yaygın olarak vermikompost olarak adlandırılır (Atiyeh ve vd., 2002). Solucanlar mekanik karıştırıcılar gibi davranır ve organik maddeyi parçalayarak fiziksel ve kimyasal durumunu değiştirir, C/N oranını kademeli olarak azaltır ve ayrıca mikroorganizmalara maruz kalan yüzey alanını artırarak mikrobiyal aktivite ve daha fazla ayrışma için çok daha elverişli hale getirir (Dominguez ve Edwards 1997). Araştırmalar, vermikompostlanmış organik atıkların besin dönüşümlerinden ve bulunabilirliğinden bağımsız olarak bitki büyümesi üzerinde yararlı etkilere sahip olduğunu tutarlı bir şekilde göstermiştir. Toprak katkı maddesi olarak veya bahçecilikte topraksız kap ortamının bileşenleri olarak kullanıldığında solucan gübresi; tohum çimlenmesini sürekli olarak iyileştirmiş, fide büyümesini ve gelişimini geliştirmiş ve bitki verimliliğini mineral besin maddelerini bitki tarafından daha kullanılabilir formlara dönüştürdüğünden artırmıştır. Solucan gübresinin yaygın olarak benimsenmesi, depolama ve

yakma gibi geleneksel atık bertaraf yöntemlerinden kaynaklanan çevresel etkilerin azaltılmasını kolaylaştıracak ve solucan gübresi hem bahçecilik hem de tarım endüstrilerinde kullanılmak üzere daha az maliyetli ve çok daha çekici malzemeler haline gelecektir (Atiyeh vd., 2002).

2. Vermikompost Yöntemleri

Toprak solucanlarının kullanıldığı solucan gübreleme sistemleri, sıralı yığınlar, atık yığınları veya konteynerler gibi düşük teknoloji içeren çok basit yöntemlerden, orta derecede karmaşık ve tamamen otomatik sürekli akış reaktörlerine kadar çeşitlilik göstermektedir (Edwards, 2004). Vermikompost yataklarının hazırlanması yaz ve kış koşullarına göre farklılık gösterir. Yazın termofilik ortamın oluşmaması için ince yatak kalınlığı tercih edilirken kış aylarında ise solucan büyümesini desteklemek ve ortam sıcaklığını sağlamak için yatak malzemesinin daha kalın serilmesi gerekir.

Vermikompost işlemi doğadaki işleyişin kontrollü olarak hızlandırılmasıdır. Koşulların kontrol edilmesi işlemin süresini kısalttığı gibi elde edilen kaliteli ürün miktarının artmasında da önemli rol oynar. İlkel koşullardan gelişmiş teknolojinin kullanıldığı sistemlere kadar birçok vermikompost üretim prosesi bulunmaktadır. Üretim genel olarak kapalı alanlarda yapılır. Alan ihtiyacına göre sistemler yatay veya dikey olarak tasarlanabilir. Her iki sistemin de birbirine göre avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Bütün sistemlerde amaç oluşan ürünü en az solucan kaybı ile sistemden çıkarabilmektir.

Vermikültür için kullanılan yaygın yatak malzemeleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Vermikültür için yaygın yatak malzemeleri (Munroe, 2004)

Yatak malzemesi	Emicilik	Hacim oluşturma potansiyeli	C:N oranı
At gübresi	Orta - İyi	İyi	22-56
Turba yosunu	İyi	Orta	58
Mısır silajı	Orta - İyi	Orta	38-43
Saman-genel	Zayıf	Orta	15-32
Saman - genel	Zayıf	Orta - İyi	48-150
Saman - yulaf	Zayıf	Orta	48-98
Saman - buğday	Zayıf	Orta - İyi	100-150
Belediye atıklarından elde edilen kağıt	Orta - İyi	Orta	127-178
Gazete	İyi	Orta	170
Kabuk - sert ağaçlar	Zayıf	İyi	116-436
Kabuk - yumuşak ağaçlar	Zayıf	İyi	131-1285
Oluklu mukavva	İyi	Orta	563
Kereste fabrikası atığı - yonga	Zayıf	İyi	170
Kağıt lifi çamuru	Orta - İyi	Orta	250
Kağıt fabrikası çamuru	İyi	Orta	54
Talaş	Zayıf - Orta	Zayıf - Orta	142-750
Çalı kırpıntıları	Zayıf	İyi	53
Sert ağaç yongaları, talaşı	Zayıf	Zayıf - Orta	451-819
Yumuşak ağaç yongaları, talaşı	Zayıf	İyi	212-1313
Yapraklar (kuru, gevşek)	Zayıf - Orta	İyi	40-80
Mısır sapları	Zayıf	İyi	60-73
Mısır koçanı	Zayıf - Orta	İyi	56-123

2.1 Sıralı Yığın Sistemi (Kesikli Sistem)

Sıralı yığın yöntemi, düşük sermayeli, kolay yönetilebilir ve en basit vermikompost prosesidir. Güneşten korunan, alçak beton duvarla çevrili beton bir zemin üzerine 10-15 cm yatak malzemesi serilir. Beton zemin yataklara fazla suyun girmesini önleyecek ve fazla suyu yataktan kolayca tahliye edecek şekilde inşa edilmelidir. Başka bir yerde yetiştirilmiş olan solucanlar yatağa ilave edilir. Yığın günlük olarak izlenmelidir. Yüzeyde beslenme belirtileri fark edildiğinde, 7 ila 10 cm'lik başka bir hammadde katmanı eklenebilir. Yığınlar ve yer yatakları organik atıkları nispeten yavaş bir şekilde işler; genellikle tam işleme 6 ila 12 ay sürer. Bu dönemde buharlaşma veya sızma nedeniyle bitki besin maddelerinde kayıplar meydana gelebilir. Sıralı yığınların en büyük dezavantajları, solucan gübresinin hasadındaki zorluklar ve kullanılmadan önce solucanların gübreden ayrılmasıdır. Ayırma işleminde sıklıkla tamburlar kullanılmakla birlikte solucanların tamamen ayrılması güçtür. Sıralı yığınlar birkaç farklı yolla gerçekleştirilebilir (Edwards, 2004).

2.1.1 Statik Yığın Sıraları

Statik yığın sıraları (kesikli), solucanlarla aşılanmış ve süreç tamamlanana kadar bekletilen karışık yatak ve yem (veya üstüne yem serilmiş yatak) yığınlarıdır. Bu yığınlar genellikle kare, dikdörtgen veya alana uygun sıralı bir şekilde düzenlenir. Yükseklikleri başlangıçta 1 m'yi geçmemelidir. Solucanların gelişimini sağlamak için yatak türü ve miktarının seçimi önemlidir. Yığınların karıştırılmasına gerek olmasa da, sulanmalı ya da üzeri örtülmelidir. Statik yığın sıralarında ürünü solucandan ayırmak için bir solucan hasat makinesinden geçirmek veya bir sonraki sıralı gruba solucanların kendiliğinden geçebileceği şekilde ayarlamak gerekir. İlkel sayılabilecek bu yöntemin enerji ihtiyacı olmaması avantajıdır. Bununla birlikte alan ve işçilik ihtiyacı fazladır.



Şekil 1. Statik Yığın Sıraları Örneği (https://www.indiamart.com/proddetail/free-vermicompost-bed-setup-service-22563219773.html?mTd=1 (Erişim 04/11/2024))

2.1.2 Üstten Beslemeli Sıralar

Üstten beslemeli sıraların statik yığın sıralarından farkı başlangıçta ince bir tabaka yatak malzemesi serilerek solucanların ilave edilmesidir. Solucan faaliyeti devam ettikçe sürekli üstten besleme yapılarak işleme devam edilir. Önce altlık yerleştirilir, ardından solucanlarla aşılanır ve sonrasında tekrar tekrar ince (10 cm'den az) yiyecek katmanlarıyla besleme yapılır. Solucanlar genellikle yiyecek/yatak ara yüzündeki yiyeceği tüketir, ardından dökütülerini yığının dibine yakın bir yere bırakırlar. Zaman içinde, altta olgunlaşmış ürün, ortada kısmen tüketilmiş yatak ve üstte daha taze gıda olacak şekilde katmanlı bir yığın oluşturulur. Solucanlar tarafından kademeli olarak tüketilen yatak malzemesinin yerini almak için periyodik olarak yeni yatak katmanları eklenmelidir. Bu yığınlar sürekli besleme gerektirir ve kışın işletilmesi imkansız olmasa da zordur. Ayrıca,

yığın örtüleri kullanılıyorsa, solucanlar her beslendiğinde çıkarılıp değiştirilmelidir. Üstten beslemenin avantajları esas olarak operatörün solucanların ortamı üzerinde daha fazla kontrole sahip olmasıyla ilgilidir. Yiyecek düzenli olarak eklendiğinden, operatör aynı anda koşulları kolayca değerlendirebilir ve gerektiğinde besleme oranı, pH, nem içeriği vb. gibi şeyleri değiştirebilir. Bu, daha fazla solucan üretimi ve üremesi ile daha yüksek verimli bir sistemle sonuçlanma eğilimindedir.

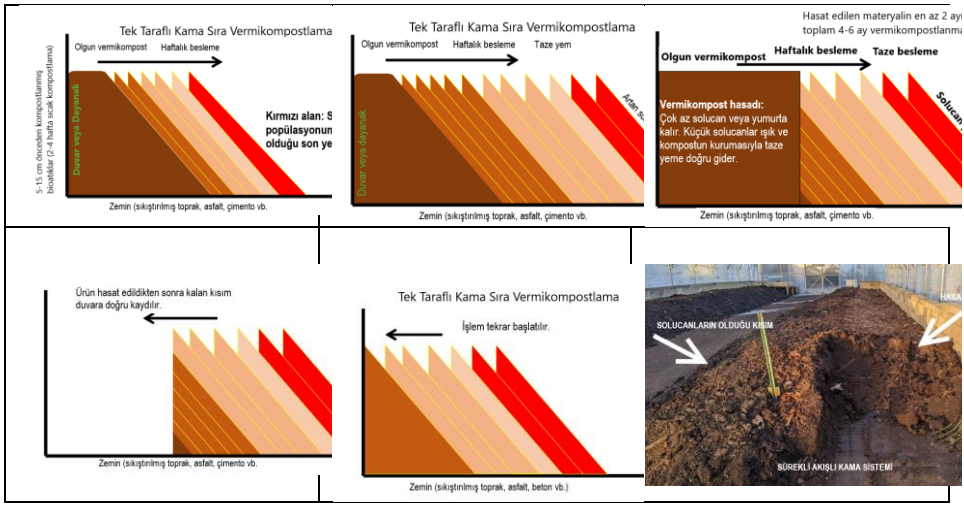
Hasat, genellikle kepçeli bir ön yükleyici veya traktörle önce üstteki 10-20 cm'lik kısmın alınmasıyla gerçekleştirilir (Bogdanov, 1996). Bu malzeme solucanların çoğunu içerecek ve bir sonraki yığın kurulumunda solucan kültürü aşılaması için kullanılabilecektir. Kalan malzeme çoğunlukla solucan gübresi ve bir miktar işlenmemiş yatak malzemesi olacaktır. Bu malzeme olduğu gibi yeni kurulacak sistemde kullanılabilir ya da elenerek işlenmemiş malzeme olarak prosese geri beslenebilir. Yataklar yaz ayları boyunca üstten beslemeli olarak çalıştırılmalıdır. Sonbaharın sonlarında 0,5m kadar saman veya başka bir yalıtım malzemesi ile kaplanarak kış ayında solucan kültürünün koruması sağlanır. İlkbaharda yalıtım örtüsü kaldırılır ve üstüne taze yiyecek tabakası yerleştirilir. Bu işlem ile yüzeye çıkan solucanlar uygun bir toplama aparatı (genellikle kepçe) kullanılarak yeni sezonun yığınlarını aşılamak için kullanılabilecektir. Geriye kalan malzeme iyi işlenmiş ve tarlalara uygulanmaya hazır solucan gübresidir.

2.2 Kama Sistemi (Sürekli Akış)

Kama sistemi dikey bir çıkarılabilir bariyere (duvar, çit, perde vb.) 45°'lik bir açıyla birbirini takip eden ince katmanların (5-10 cm) veya organik atıkların eklenmesine dayanmaktadır (Edwards, 2004). Bu sistemler herhangi bir genişlik veya uzunlukta olabilir ancak yükleme kolaylığı açısından yüksekliği yaklaşık 1,2-1,5 m ile sınırlıdır. İşlem sıkıştırılmış toprak, asfalt, beton vb. bir zemin üzerinde gerçekleştirilir. Sistem, yaklaşık 15 cm derinliğe kadar m^2 başına 9 kg (ıslak ağırlık) *E. fetida* (veya diğer türler) içeren kısmen vermikompostlanmış biyokatılar veya diğer organik atıklardan oluşan bir başlangıç katmanı ile başlar. Yüzey, gerektiğinde ince bir su spreyi ile 15 cm derinliğe (%80 nem içeriği) kadar nemli tutulur. Toprak solucanları, tamamen işlenmiş organik atıkların eski katmanlarından, her gün eklenen kama yüzeyindeki taze malzemeye doğru aşamalı olarak hareket eder, böylece tüm toprak solucanı populasyonu her zaman ön yüzeyin 15-20 cm altında yoğunlaşır. Solucanlar zamanla taze besini takip eder ve işlenmiş malzemeyi geride bırakır. Uygun aralıklarla (1-2 ay) çıkarılabilir bariyer kaldırılır ve kamanın ön yüzünün yaklaşık 60 cm gerisine yerleştirilir, böylece atık toplandığında hiçbir toprak solucanı sistemden çıkarılmaz. Bu bariyerin arkasındaki işlenmiş atıkların tamamı ön yüklemeli makinelerle çıkarılabilir ve solucanlardan

arındırılmış olarak toplanıp daha sonra %35-45 nem oranına kadar kurutulur, elenir ve paketlenir. Kama sisteminde atıkların işlenmesi yaklaşık 3-4 ay sürer.

Kama sistemini kışın işletmek imkansız olmasa da zordur. Çalışma yüzeyine düzenli olarak taze gübre eklenmesi, yüzeyin arkasında solucanların gelişmeye ve çoğalmaya devam edeceği bir "ılıman bölge" oluşturmak için yeterli ısı yaratabilir. Bir başka seçenek de sonbaharın sonlarında üst kısma taze gübre sermek, tüm malzemeyi kalın bir saman tabakasıyla örtmek ve ilkbaharda örtüyü açıp çalışmalara yeniden başlamak olabilir. Şekil 2'de sürekli akışlı kama sisteminin işlem basamakları gösterilmiştir.



Şekil 2. Sürekli Akışlı Kama Sistemi

Kama sitemi ile vermikompost üretiminde; düşük sermaye ihtiyacı, sıralı yığın oluşturmaya göre daha az işçilik gereksinimi, işlem süresinin kısa olması, yığında sızıntının az olması ve solucansız hasat bu tip sistemlerin avantajı olurken kapalı alan ve cihaz gereksinimi ise dezavantajıdır.

2.3 Konteynır Sistem

Doğrudan zeminde yapılmayan vermikompost üretimidir. Zeminin üzerinde veya gömülmüş vaziyette olan çeşitli malzemelerden imal edilmiş tankların içerisinde üretim yapılır.

2.3.1 Çukur, Tank ve Beton Halkaları

Vermikompost üretiminde kullanılan çukurlar zemin toprak zemin kazılarak inşa edilirler. Genel olarak 1 m derinlik ve 1,5 m genişlikte olan bu yapılarda delikli veya normal tuğla, beton vb. malzeme kullanılır. Bölmeler arasında solu-

canların geçebileceği delikler bulunur. Vermikompost malzemesi bir tarafa dökülür. Solucanların yüzeye çıktıkları görüldüğünde diğer bölmeye vermikompost malzemesi konulur. Zaman içerisinde solucanlar taze besinin olduğu tarafa doğru hareket ederek olgun vermikompostu terk eder. Vermikompost tankları yine benzer sistemle çalışan fakat zemin üzerine inşa edilen sistemlerdir. Beton halkaları ise çok yaygın kullanılmamakla birlikte zemin üzerinde vermikompost üretimi yapılan konteynır sistemleridir. Özellikle alan sınırlaması olan yerlerde tercih edilir. Şekil 3'de vermikompost üretiminde kullanılan çukur, tank ve beton halkalarına örnek görseller yer almaktadır (Srinivasarao vd., 2014; Ettammal, 2018; Nagavallemma vd., 2005).



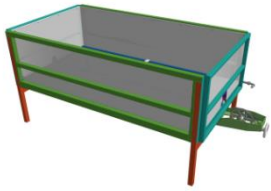
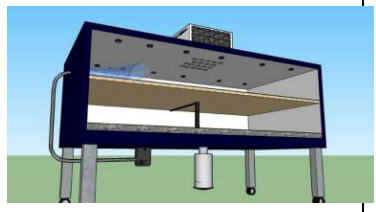
Vermikompost Çukuru Vermikompost Tankları Beton Halkalar

Şekil 3. Vermikompost Üretiminde Kullanılan Çukur, Tank ve Beton Halkaları (Srinivasarao vd., 2014; Ettammal, 2018

2.3.2 Küçük ve Büyük Ölçekli Vermikompost Sistemleri

Vermikompost üretimi farklı amaçlar için birçok büyüklükte yapılabilir. Evlerden çıkan organik atıkların geri dönüşümünde kullanılan küçük kaplardan, küçük bahçelerde kişisel üretim ve ticari üretime kadar çeşitlilik gösteren üretim yöntemleri vardır. Bireysel olarak hobi amaçlı üretim, küçük ev bahçeleri için kutu tipi üretim veya ticari gelir elde etmek amaçlı endüstriyel sistemler için çok sayıda seçenek mevcuttur. Bununla birlikte temelde üretim şekli aynıdır

(Ghorbani vd., 2021). Şekil 4'de farklı büyüklüklerdeki sistemlere örnekler sunulmuştur.

		
https://working-worms.com/	Wormgear CFT Plans, 2024	Commercial Scale CFTs, 2024
		
The Hungry Bin, 2024	Mohite vd., 2024	Ghorbani vd., 2021

Şekil 4. Küçük ve Büyük Ölçekli Vermikompost Sistemleri

3. Olgun Vermikompostu Toprak Solucanlarından Ayırma Yöntemleri

Vermikompostlama işleminden sonra olgun vermikompostun hacmi ilk baştaki yatak hacminin yaklaşık %10'u kadardır. Olgun kompost kokusuz, kahverengi ve toprak görünümündedir ve görüntüsü ilk konulan yatak malzemesinden tamamen farklıdır. Vermikompostlamada en büyük zorluk olgun komposttan solucanların ayrılmasıdır. Uygulanan yöntemlerde solucan kaybı veya kompost kaybı olur. Aşağıda açıklanan yöntemler küçük ölçekli konteynır sistemler veya pilot uygulamalar için geçerlidir. Sistem büyüdüğünde ticari ölçekli bir örgü elek kullanılması gerekecektir.

3.1 Işık Ayrımı

Bu yöntem solucanların ışığa olan duyarlılığını ve ışık kaynaklarından kaçmak için yüzeyin altına girme eğilimini kullanır. Bitmiş malzeme çıkarılıp bir yüzeye yayılabilir veya yerinde bırakılabilir, ancak bir ışık kaynağına maruz bırakılmalıdır. Solucanlar hızla aşağıya doğru hareket edecek ve yüzeydeki malze-

menin çıkarılmasına izin verecektir. Bu işlem tekrarlandıktan sonra, tüm solucanları içeren ince bir malzeme tabakası kalır. Bu, yeni bir yem kaynağıyla birlikte yeni yatağa eklenmelidir. Böylece geriye solucan döküntüleri ve yumurtadan çıkmamış kapsüller kalır. Yavrular bahçe toprağında hayatta kalamayacağı için bu kapsüller kaybolacaktır, ancak kalan solucanlar hızla bunların yerini alır. Dökümler gübre olarak kullanılmadan önce bir ya da iki hafta saklanmalıdır.

3.2 Yana Doğru Ayırma / Yanal Ayırma

Bitirilmiş malzeme bir tarafa taşınırken, organik atıkla karıştırılmış taze yataklık yanına yerleştirilir. Takip eden 7-14 gün boyunca solucanlar, olgunlaşmış solucan gübresinden taze yatağa göç edecektir. Bu yöntemin avantajı, kapsüllerin bu arada yumurtadan çıkmasına izin vermesi ve çoğunun da karşıya geçmesidir.

3.3 Dikey Ayırma

Kabın yüzey alanından biraz daha büyük bir naylon elek solucan gübresinin yüzeyine yerleştirilir. Elek, kabın kenarlarını üst üste bindirerek düzleştirecek kadar büyük olmalıdır. Elek şekildeki gözenekli kap üzeri taze yatak malzemesi ile doldurulur ve organik atıkla beslenir. Solucanlar alttaki besin kaynağı tükendikçe elekten yukarıdaki yeni yatağa doğru göç edecektir.

Üst kısım solucan hasadı için hazır olduğunda, elek ve solucanları içeren bitmiş malzeme kaptan arındırılır. Kabın alt kısmında kalan malzeme çok yüksek konsantrasyonda solucan gübresi ve çok az solucan, yavru veya kapsül içerecektir. Bunlar çıkarıldıktan sonra, elek üstündeki solucan dolu malzeme, elek üstünde taze yatak malzemesi olacak şekilde kabın altına yerleştirilir.

3.4 Eleme

Solucan gübresi, özellikle yataklığa iri yeşil atık eklenmişse, parçalanması daha uzun sürdüğü için, sonradan eleme gerektirebilir. Bu, pilot ölçekte elle gerçekleştirilebilir, ancak ticari boyutta bir üretimde döner bir elek kullanılarak eleme ve ayırma işlemi yapılır. Solucanlar bitmiş solucan gübresinden etkili bir şekilde ayrılır, ancak kokonlar (solucan yumurtası) ve yavrular kaybedilir. Belediye ölçeğinde solucan gübresi ile ilgili bilgiler nispeten azdır, çünkü teknik genellikle daha küçük ölçeklerde kullanılmıştır veya olta balıkçılığı pazarı için solucan yetiştirme ile birleştirilmiştir. "Yardımsız" sıra kompostlamanın aksine, solucan gübresinin hacim veya zaman kısıtlamalarına bağlı olarak farklı derecelerde son ürün üretme potansiyeli olan birkaç farklı uygulaması vardır.

1. Vermikompost elde etmek için organik atıkların tamamen işlenmesi.

Bu yöntem, solucan gübresi formunda en yüksek kalitede son ürün üretir. Bunlar genellikle standart kompostlanmış materyalden çok daha yüksek konsantrasyonlarda besin içerir. Solucan gübresi, dökme kompost veya bitki yatağı materyali olarak değil, bahçecilik sektöründe yüksek kaliteli bir toprak düzenleyici olarak kullanılma eğilimindedir.

2. Kompostlama sürecini hızlandırmak veya standart komposttan daha yüksek kalitede bir ürün elde etmek için organik materyalin kısmen işlenmesi (komposta uygun olmayan maddelerin ayrılması, kıyma parçalama işlemleri, ön Kompostlama vb.) gerekir.

3. Vermikompostlama işlemi kapalı kap içerisinde yapıldığında bile açık hava kompostlama biçimlerinde olduğu gibi, organik maddenin çürümesiyle ilişkili rahatsız edici koku oluşturmaz.

4. Solucan gübresi üretiminin enerji gereksinimleri, mevcut atık bertaraf sistemleriyle karşılaştırıldığında çok küçüktür ve işleme maliyetleri ihmal edilebilir düzeydedir.

8.9 Kompostlama ve Solucan Gübresi Üretiminin Kombinasyonu

Geleneksel termofilik kompostlama işleminde, aerobik koşulları korumak için organik malzemenin düzenli olarak karıştırılması veya başka bir yöntemle havalandırılması gerekir. Bu genellikle kalıntıları mümkün olduğunca hızlı bir şekilde büyük ölçekte işlemek için ağır ve pahalı ekipman gerektirir. Vermikompostlamada, yalnızca aerobik koşullar altında hayatta kalabilen solucanlar, hem malzemenin döndürülmesi hem de aerobik durumda tutulması rollerini üstlenir ve böylece pahalı ekipmanlara olan ihtiyaç azalır. Bu bariz avantajın yanı sıra, ürün (solucan gübresi) homojendir, karakteristik olarak arzu edilen bir estetiğe sahiptir ve daha düşük seviyelerde kirletici içerebilir (Ndegwa ve Thompson, 2001). Vermikompost ve kompostta bulunan mikrobiyal topluluklar arasında belirgin farklılıklar mevcuttur ve dolayısıyla vermikompostlama ve kompostlaştırmada mikrobiyal süreçlerin doğası oldukça farklıdır (Subler vd., 1998). Vermikompostlama, kağıt fabrikası ve süt ürünleri çamurunun geleneksel kompostlamasına kıyasla üretim oranını %40-60 oranında artırmıştır (Elvira vd., 1998). Kompost ve solucan gübresinin karşılaştırılması, solucan gübresinin yoğun ayrışmaya maruz kaldıkça önemli ölçüde daha düşük C:N oranına sahip olduğunu göstermiştir (Lazcano vd., 2008). Sinha vd. (2010), kompost ve solucan gübresini karşılaştırarak 10 hafta boyunca domates bitkilerinin büyümesini incelemiş ve bütün haftalarda vermikompost uygulanan domateslerin daha fazla büyüdüğünü bildirmiştir.

Başka bir raporda, solucan gübresinin bahçe kompostuna oranla hem makro hem de mikro besin maddelerini daha yüksek oranda (yaklaşık 2 katı) içerdiği gözlemlenmiştir (Nagavallemma vd., 2004). Benzer şekilde, pirinç (Oryza sativa) bitkisi tarafından azot (N), fosfor (P), potasyum (K) ve magnezyum (Mg) alımı, gübre solucan gübresiyle birlikte uygulandığında artmıştır (Jadhav vd., 1997). Vermikompostun olumlu etkileri arasında yeşil mercimek (Karmegam vd., 1999), domates bitkisi (Atiyeh vd., 2000; Zaller, 2007), petunya (Arancon vd., 2008) ve çam ağaçları (Lazcano vd., 2010) gibi çeşitli bitki türlerinde tohum çimlenmesini uyarır. Solucan gübresi ayrıca vejetatif büyüme üzerinde olumlu bir etkiye sahiptir, sürgün ve kök gelişimini uyarır (Adhikary, 2012). Etkiler arasında yaprak alanının ve kök dallanmasının artması gibi fide morfolojisinde değişiklikler yer alır (Lazcano vd., 2009) ve ayrıca bitki çiçeklenmesini uyardığı, üretilen çiçeklerin sayısını ve biyokütlesini artırdığı (Arancon vd., 2008; Atiyeh vd., 2002) ve meyve verimini artırdığı gösterilmiştir (Arancon vd., 2004a; Arancon vd., 2004b; Atiyeh vd., 2000b; Singh vd., 2008).

Kompost ve vermikompost süreçlerinin sıralı bir şekilde birlikte yürütülmesi ile hem toplam atık miktarında hem de uçucu katılarda daha büyük bir azalma sağlamıştır. İki sürecin birlikte yürütülmesi çözünebilir N ve P'da önemli bir azalma sağlayarak ayrı ayrı kullanılmalarından daha etkili bir arıtım sağladıkları gözlenmiştir. Kompostlama ve vermikompostlama kombinasyonu, son zamanlarda stabilize edilmiş substratlar elde etmenin bir yolu olarak düşünülmüştür (Tognetti vd., 2007). Hem kompostlama hem de vermikompostlama, organik atıklar, mikroorganizmalar, nem ve oksijen içerikleri arasındaki karmaşık etkileşimleri içeren, organik atıkların aerobik biyolojik bozunma süreçleridir.

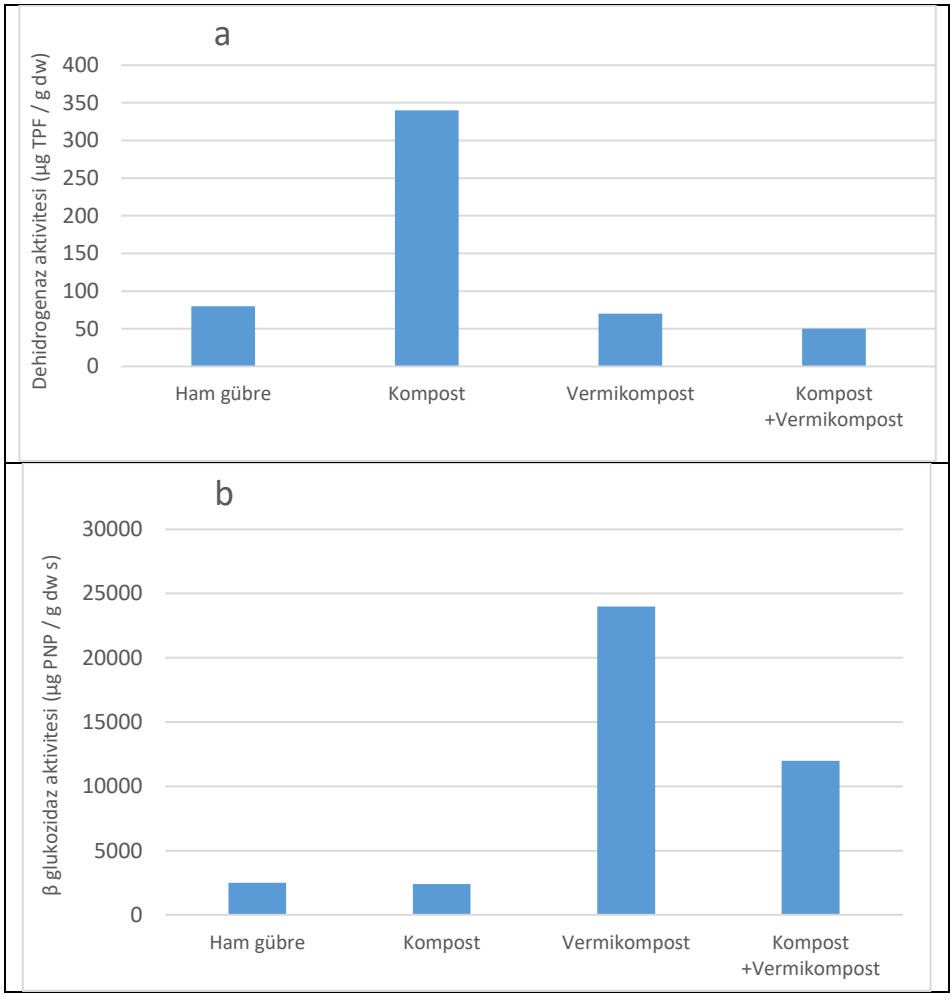
Nemlendirilmiş kompostlar ve solucan gübreleri, ham organik atıklarla yaygın olarak ilişkilendirilen bazı büyük bozulmalara neden olmadan toprak ekosistemiyle hızla dengeye ulaşır. Bu ürünler, besin kaynakları olarak tarımda ve toprak iyileştirmede değerlidir. Günümüzde, termofilik kompostlama bilimi iyi bilinmekte ve organik atık yönetiminde yaygın olarak uygulanmaktadır. Beslenme ve mikrobiyal ardışıklıkla ilgili çeşitli yönler, kompostlama sürecini karakterize eder. Mikrobiyal ardışıklığın birincil etkisi, bir grup organizmanın bir sonraki gruba giden yolu açması şeklinde bir örüntünün kurulmasıdır. Bazen sinerji olarak da adlandırılan paralel, iyi bilinen bir özellik olan sentrofi, mikrobiyolojik terminolojide tanınmıştır ve karışık bir kültür olarak büyürken iki veya daha fazla bakteri grubu arasındaki besinsel ve metabolik etkileşimleri ifade eder. Sentrofi veya sinerji yoluyla, bir grup organizma tarafından üretilen metabolik son ürünler, sonrakiler tarafından besin olarak kullanılabilir. Bu nedenle, birlikte büyüyen

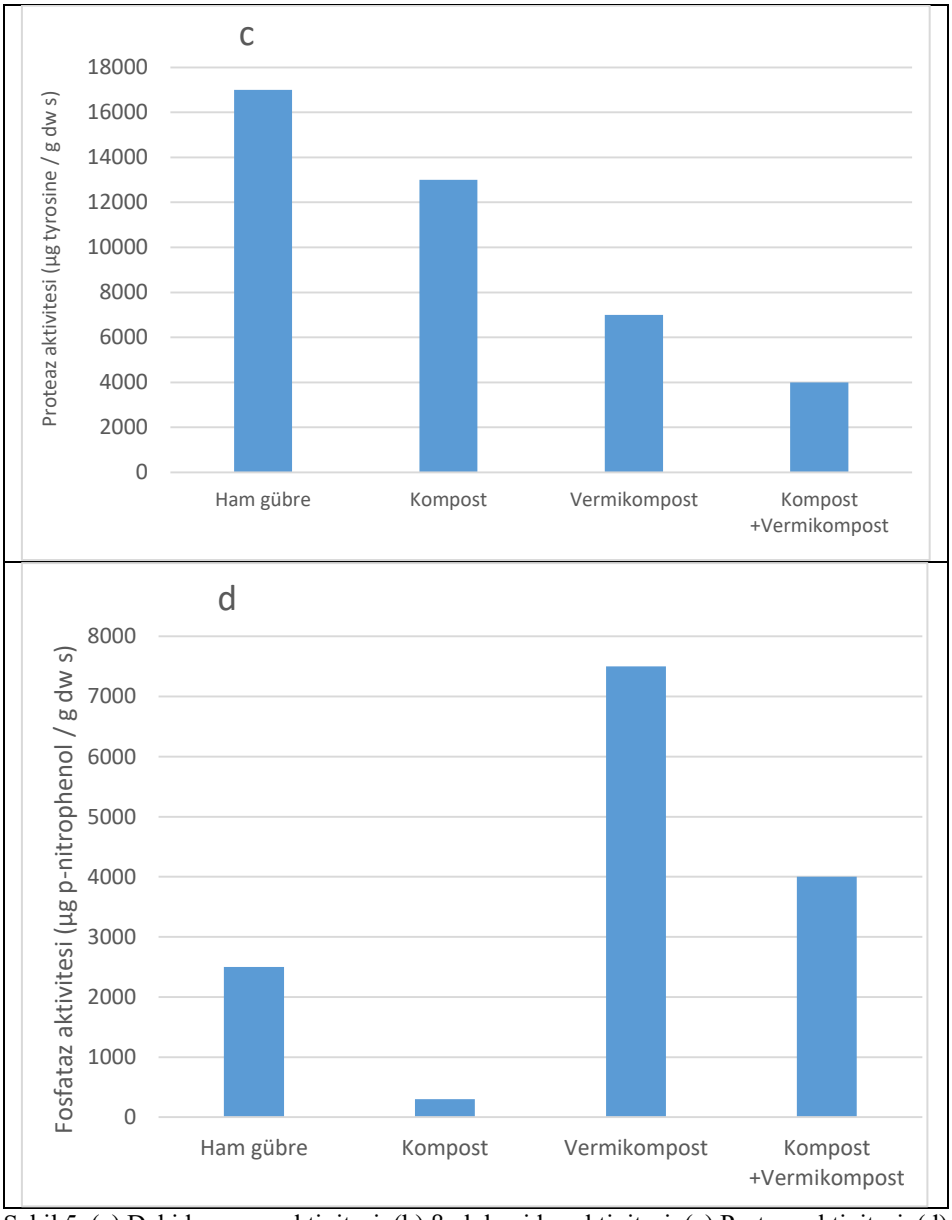
iki veya daha fazla farklı organizma türünün birleşik aktiviteleri, her bir organizmanın toplam aktivitelerinden niceliksel veya niteliksel olarak çok farklı olan nihai ürünlerle sonuçlanabilir. Organik maddenin işbirlikçi veya sentrofik ayrışması, hem organik atıkların kompostlanmasında hem de solucan gübresinde normal olayların seyridir. Ancak, hem doğal çürüme hem de solucan gübresi sistemlerinde, çok çeşitli mikroorganizmalar ve toprak omurgasızları büyür ve etkileşime girerek "madde döngüsüne" katkıda bulunur. Solucan gübresi sistemi karmaşık besin ağlarını sürdürür ve çeşitli besin elementlerinin farklı kimyasal formları, besin dinamikleri ve bitki büyüme düzenleyicileri açısından önemli olan uzun ömürlü organik bileşiklere dönüşür.

Hem kompostlama hem de vermikompostlama, taze organik atıkları, bitki büyümesi için mevcut besinler açısından zengin, kolayca biyolojik olarak parçalanabilen karbon açısından fakir, fito-inhibitör maddeler açısından neredeyse tükenmiş ve bitki ve insan patojenlerinden nispeten arınmış faydalı ürünlere dönüştürür. Öznel olarak, olgun bir kompost koyu kahverengi veya siyah olmalı, granüler, süngerimsi veya lifli bir dokuya sahip olmalı ve küf veya toprak gibi kokmalıdır. Olgun bir vermikompost koyu siyah olmalı, genellikle mükemmel yapı, gözeneklilik, havalandırma ve drenaj özelliklerine ve yüksek nem tutma kapasitesine sahip ince bölünmüş turba benzeri bir malzeme olmalıdır. C:N oranı, kompostlama veya solucan gübresi yapma sürecinden geçen materyalin gelişimini izlemek için en yaygın kullanılan parametrelerden biridir. Bu oran hammaddelere bağlı olarak önemli ölçüde değişir ve kendi başına kompost olgunluğuna dair güvenilir göstergeler veremez. Olgun bir kompost veya solucan gübresinin C:N oranı ideal olarak 10 civarında olmalıdır, ancak dirençli organik bileşiklerin veya zayıf ayrışan materyallerin varlığı nedeniyle bu neredeyse hiç elde edilemez. Olgun kompost ve solucan gübrelerinde 35,6 ila 50,8 arasında değişen C:N oranları, toprakta ayrışmaya devam etmediği sürece ve topraktan ek N kullanmadığı sürece kabul edilebilir. Olgunlaşma süreci boyunca, humik maddeler, fulvik asitlere göre humik asitlerin giderek artan bir baskınlığı ile nitel olarak gelişir; bu ikisi arasındaki oran, kompost olgunluğunun önemli bir endeksi olarak kabul edilir ve olgun bir kompostta 1'den fazla olması gerektiği kabul edilir. Bir kompostun veya vermikompostun olgunluğunun en iyi göstergesi, kromatografi veya tohum çimlenme testleri kullanılarak tespit edilebilen, biyo-inhibitör alifatik asitlerin ve fenoliklerin bulunmamasıdır. 100 g numunede Salmonella, insan virüsleri, enfeksiyöz parazitik helmint yumurtaları ve en fazla 5×10^4 fekal koliform ve 5×10^5 fekal streptokok bulunmuyorsa, bir kompost ve solucan gübresinin hijyenik olarak kabul edilmesi önerilmiştir.

N mineralizasyon testi, organik madde stabilitesini 10 günlük bir kuluçka süresi boyunca organik ve mineral N arasındaki mevcut dengeye bağlı olarak değerlendirir. Solunum oranları doğrudan mikrobiyal metabolizmanın hızıyla ilişkilidir; bu nedenle, kompost olgunluğuyla ters orantılıdır.

Kompostlama işlemi genellikle son ürünlerin pH'ını düşürür ve kompost toprakta bir tampon görevi görür. Kompost ayrıca yüksek oranda kullanılabilir bitki besinleri sağlayabilir ve su tutma kapasitesi, katyon değişim kapasitesi, toprak havalanması ve geçirgenliği ve su infiltrasyonu gibi toprağın fiziksel özelliklerini iyileştirebilir; bunların hepsi toprak erozyonunu ve yüzey akışıyla besin kayıplarını azaltmaya önemli ölçüde katkıda bulunur. Kompostlama, organik madde mineralizasyonunun ve buharlaşmayla su kayıplarının bir sonucu olarak gözle görülür bir hızlı hacim ve ağırlık azalmasına neden olur; ayrıca hacim ve kütle başına besin içeriği artar. Koku sorunları ve sinek ve sıçanların çoğalması etkili yönetimle en aza indirilebilir. Kompostlama, bitki patojenlerine ve ayrıca yabani ot tohumlarına karşı antagonistler üretir ve işlem sırasında oluşan yüksek sıcaklıklar sayesinde patojenik organizmalar ortadan kaldırılabilir. Kompostlama işlemi humuslu bileşiklerin miktarını artırır ve toplam ağır metal miktarı artmasına rağmen (işlem sırasında mineralizasyonla oluşan karbon kayıplarının bir sonucu olarak), biyolojik olarak kullanılabilir ağır metallerin miktarı bu polimerize maddelerle kararlı komplekslerin oluşması nedeniyle azalma eğilimindedir. Solucan gübresi atık yığın yoğunluğunu azaltır. Solucan gübresi üretimi sırasında insan patojenlerinin de muhtemelen antagonistik bir mekanizma yoluyla ortadan kaldırıldığı gösterilmiştir. Vermikompostlama aynı zamanda N mineralizasyonuna da yol açar, ancak solucanların solucan gübresi üretimindeki varlığı N mineralizasyon oranını artırır ve hızlandırır. Dahası, olgunlaşma aşamasında gerçekleşen humifikasyon oranları solucan gübresi sırasında daha yüksek ve daha hızlıdır ve bu da biyolojik olarak kullanılabilir ağır metallerin daha çok azalmasına neden olur. Son ürünün bitki büyümesini ve ürün verimini hızlandırabilecek hormon benzeri bileşikler veya bitki büyüme düzenleyicileri içerebileceğine dair dolaylı kanıtlar vardır. Kompostlama ve solucan gübresi sırasında enzim konsantrasyonundaki değişiklikler Şekil 5'de gösterilmiştir.


a
Dehidrogenaz aktivitesi (µg TPF / g dw)
400
350
300
250
200
150
100
50
0
Ham gübre
Kompost
Vermikompost
Kompost +Vermikompost
b
β glukozidaz aktivitesi (µg PNP / g dw s)
30000
25000
20000
15000
10000
5000
0
Ham gübre
Kompost
Vermikompost
Kompost +Vermikompost



Şekil 5. (a) Dehidrogenaz aktivitesi, (b) β glukozidaz aktivitesi, (c) Proteaz aktivitesi, (d) Ham sığır gübresindeki fosfataz aktivitesi, kompostlamanın aktif fazı, Solucan gübresi ve aktif fazın sonuna kadar kompostlama artı solucan gübresi (Kompostlama + Solucan gübresi)

Kompost olarak geri dönüştürülen organik atıklar ayrıca inorganik gübreler ve turba gibi sınırlı kaynakların kullanımını azaltır ve organik atıkların bertaraf maliyetlerini düşürür. Tarım arazilerine kompost yaymak, besin maddelerinin daha düzgün bir şekilde dağılmasına yol açabilir ve ham organik atıkların eklenmesinin aksine, fideler ve bitki kökleri üzerinde fitotoksik etki oluşmaz. Organik atık yönetiminde kompostlama ve vermikompostlama teknolojilerinin uygulanmasındaki temel amaç, atık depolama sahalarının azaltılması ve ticarileşmeye uygun, katma değerli ürünler elde edilmesi olmuştur. Bu iki süreç, organik atıkları stabilize etmek ve aynı zamanda bertaraflarından kaynaklanabilecek çevresel sorunları çözmek veya en aza indirmek için son derece önemlidir. Termofilik kompostlama süreci, geleneksel düşük teknolojili solucan gübresi sistemlerinden daha hızlı bir şekilde kirlenme sorunlarını ortadan kaldırmak için büyük miktarda organik atığın hızlı bir şekilde işlenmesi için uygun görünmektedir. Bununla birlikte, vermikompostlama için son dönemlerde planlanan sürekli reaktör sistemleri, organik atıkların hızlı ve büyük ölçekli işlemesi için de aynı derecede uygulanabilir olacağı görünmektedir.

Kaynakça

Adhikary, S. (2012). Vermicompost, the story of organic gold: A review. *Agricultural Sciences, 3*(7), 905-917.

Alidadi, H. (2005). Combined compost and vermicomposting process in the treatment and bioconversion of sludge. *Iran J Environ Health Sci Eng, 2*(4), 251–254.

Arancon, N., Edwards, C., & Atiyeh, R. (2004a). Effects of vermicomposts produced from food waste on the growth and yields of greenhouse peppers. *Bioresource Technology, 93*, 139-144.

Arancon, N., Edwards, C., & Bierman, P. (2004b). Influnces of vermicomposts on field strawberries: Effects on growth and yields. *Bioresource Technology*, 145-153.

Arancon, N., Edwards, C., Babenko, A. C., Cannon, J., Galvis, P., & Metzger, J. (2008). AInfluences of vermicomposts, produced by earthworms and microorganisms from cattle manure, food waste and paper waste, on the germination, growth and flowering of petunias in the greenhouse. *Applied Soil Ecology, 39*, 91-99.

Arancon, N., Edwards, C., Babenko, A., Cannon, J., Galvis, P., & Metzger, J. (2008). Influences of vermicomposts, produced by earthworms and microorganisms from cattle manure, food waste and paper waste, on the germination, growth and flowering of p. *Applied Soil Ecology, 39*, 91-99.

Asha, A., Tripathi, A., & Soni, P. (2008). Asha A, Tripathi AK, Soni P (2008) Vermicomposting: a better option for organic solid waste management. *J Hum Ecol, 24*, 59–64.

Atiyeh, R., Arancon, N., Edwards, C., & Metzger, J. (2000b). Influence of earthworm-processed pig manure on the growth and yield of green house tomatoes. *Bioresource Technology, 75*, 175-180.

Atiyeh, R., Dominguez, J., Subler, S., & Edwards, C. (2000a). Changes in biochemical properties of cow manure during processing by earthworms (Eisenia andrei, Bouché) and the effects on seedling growth. *Pedobiologia, 44*, 709–724.

Atiyeh, R., Lee, S., Edwards, C., Arancon, N., & Metzger , J. (2002). The infl uence of humic acids derived from earthworm-processed organic wastes on plant growth. *Bioresour Technol, 84*, 7–14.

Banu, J., Logakanthi, S., & Vijayalakshmi, G. (2001). Biomanagement of paper mill sludge using an indigenous (Lampito mauritii) and two exotic (Eudrilus eugineae and Eisenia foetida) earthworms. *J Environ Biol, 22*, 181–185.

Bhatnagar, R., & Palta, R. (1996). *Earthworm-vermiculture and vermicomposting*. New Delhi: Kalyani Publishers.

Bin, T. H. (2024, 11 20). *The Hungry Bin - Large, Outdoor Vermicomposting System.* Vorm Farm: https://brotherswormfarm.com/products/the-hungry-bin adresinden alındı

Bogdanov, P. (1996). Bogdanov P (1996) Commercial vermiculture: how to build a thriving business in redworms. *Vermico Press, 83*(180), 79–92.

CFTs, C. S. (2024, 11 20). *Urban Worm Company.* Commercial Scale CFTs, Urban Worm Company: https://urbanwormcompany.com/complete-guide-to-continuous-flow-vermicomposting/ adresinden alındı

Dominguez, J., & Edwards, C. (1997). Effects of stocking rate and moisture content on the growth and maturation of Eisenia andrei (Oligochaeta) in pig manure. *Soil Biol Biochem, 29*, 743–746.

Edwards, C. (2004). *Earthworm ecology.* Boca Raton: 2nd edn. CRC Press.

Elvira, C., Sampedro, L., Benitezm, E., & Nogales, R. (1998). Vermicomposting of sludges from paper mill and dairy industries with Eisenia andrei: a pilot-scale study. *Biores Technol, 63*, 205–211.

Ettammal, S. (2018). *Handbook of Vermicomposting Technology.* Kannur, Kerala, INDIA: Publisher: www.free-ebooks.net.

Gandhi, M., Sangwan, V., Kapoor, K., & Dilbaghi, N. (1997). Composting of household wastes with and without earthworms. *Environ Ecology, 15*, 432–434.

Ghorbani, M., Sabour, M., & Bidabadi, M. (2021). Vermicomposting Smart Closed Reactor Design and Performance Assessment by Using Sewage Sludge. *Waste and Biomass Valorization, 12*, 6177–6190.

Gonzalez, M., Gomez, E., Comese, R., Quesada, M., & Conti, M. (2010). Infl uence of organic amendments on soil quality potential indicators in an urban horticultural system. *Bioresour Technology, 101*, 8897–8901.

https://www.indiamart.com/proddetail/free-vermicompost-bed-setup-service-22563219773.html?mTd=1. (04/11/2024). *https://www.indiamart.com/proddetail/free-vermicompost-bed-setup-service-22563219773.html?mTd=1*. (Erişim 04/11/2024)): https://www.indiamart.com/proddetail/free-vermicompost-bed-setup-service-22563219773.html?mTd=1.

Jadhav, A., Talashilkar, S., & Pawar, A. (1997). Influence of the conjunctive use of FYM, vermi-compost and urea on growth and nutrient uptake in rice. *Journal of Maharashtra Agricultural Universities, 22*, 249-250.

Karmegam, N., Alagumalai, K., & Daniel, T. (1999). Effect of vermicompost on the growth and yield of green gram (Phaseolus aureus Roxb.). *Tropical Agriculture, 76*, 143-146.

Lazcano, C., Arnold, J., Tato, A., Zaller, J., & Domínguez, J. (2009). Compost and vermicompost as nursery pot components: Effects on tomato plant growth and morphology. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 944-951.

Lazcano, C., Gomez-Brandon, M., & Dominguez, J. (2008). Comparison of the effectiveness of composting and vermicomposting for the biological stabilization of cattle manure. *Chemosphere, 72*, 1013–1019.

Lazcano, C., Sampedro, L., Zas, R., & Domínguez, J. (2010). Vermicompost enhances germination of the maritime pine (Pinus pinaster Ait.). *New Forest, 39*, 387-400.

Lorimor, J., Fulhage, C., Zhang, R., Funk, T., Sheffield, R., Sheppard, C., & Newton, G. (2001). *Manure management strategies/technologies, White paper on animal agriculture and the environment for national center for manure and animal waste management.* Ames: Midwest Plan Service.

Mohite, D., Chavan, S., Jadhav, V., Kadam, M., & Singh , A. (2024). Vermicomposting: a holistic approach for sustainable crop production, nutrient-rich bio fertilizer, and environmental restoration. *Discover Sustainability, 5*(60), https://doi.org/10.1007/s43621-024-00245-y.

Munroe, G. (2004). *Manual of on-farming vermicomposting and vermiculture.* Nova Scotia, Canada: Organic Agriculture Centre of Canada (OACC), Dalhousie University, Nova Scotia, Canada. pp 1–40.

Nagavallemma, K., Wani, S., Lacroix, S., Padmaja, V., Vineela, C., & Shrawat, K. (2005). Vermicomposting: Recycling wastes into valuable organic fertilizer. *Journal of agriculture and environment for international development, 3/4*(99), -.

Nagavallemma, K., Wani, S., Stephane, L., Padmaja, V., Vineela, C., Babu Rao, M., & Sahrawat, K. (2004). *Vermicomposting: Recycling wastes into valuable organic fertilizer.* Global Theme on Agroecosystems. Andhra: International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics.

Ndegwa, P., & Thompson, S. (2001). Integrating composting and vermicomposting in the treatment and bioconversion of biosolids. *Bioresour Technol, 76*, 107–112.

Plans, W. C. (2024, 11 20). *TOGO Composter*. TOGO Composter, Commercial + Household Food Composter: https://shop.urbanwormcompany.com/collections/large-scale-vermicomposting-equipment adresinden alındı

Singh, R., Sharma, R., Kumar, S., Gupta, R., & Patil, R. (2008). Vermicompost substitution influences growth, physiological disorders, fruit yield and quality of strawberry (Fragaria xananassa Duch). Bioresource Technology, 99, 8507-8511. doi:10.101. *Bioresource Technology, 99*, 8507-8511.

Sinha, R., Agarwal, S., Chauhan, K., & Valani, D. (2010). The wonders of earthworms and its vermicompost in farm production: Charles Darwin's 'friends of farmers', with potential to replace destructive chemical fertilizers from agriculture. *Agric Sci, 1*, 76–94.

Srinivasarao, C., Venkateswarlu, B., Veeraiah, R., Rammohan, S., Jakkula, V., Dixit, S., . . . Rammohan, R. (2014). Vermicomposting For Efficient Crop Residue Recyling, Soil Health Improvement and Imparting Climate Resilience. *Research Bul*.

Subler, S., Edwards, C., & Metzger, P. (1998). Comparing vermicomposts and composts. *BioCycle, 39*, 63-66.

Tognetti, C., Mazzarino, M., & Laos, F. (2007). Co-composting biosolids and municipal organic waste: effects of process management on stabilization and quality. *Biol Fertil Soils, 43*, 387–397.

Zaller, J. (2007). Vermicompost as a substitute for peat in potting media: Effects on germination, biomass allocation, yields and fruit quality of three tomato varieties. *Scientia Horticulturae, 112*, 191-199.



Camilerde İş Sağlığı ve Güvenliği Uygulamaları

***Arda Yılmaz*[1]**

[1] Üsküdar Üniversitesi, ORCID: 0000-0002-0950-5502

GİRİŞ

Camilerde iş sağlığı ve güvenliği (İSG), toplumun geniş kesimlerinin bir araya geldiği bu kutsal mekânlarda güvenliği sağlamak adına büyük önem taşır. Hem ibadet edenlerin hem de cami personelinin güvenli bir ortamda bulunması, iş kazalarının ve sağlık sorunlarının önlenmesi amacıyla camilerde alınması gereken İSG önlemlerinin titizlikle uygulanmasını gerektirir. Camiler, yalnızca ibadet edilen değil, aynı zamanda toplumsal dayanışma ve sosyal etkileşimin sağlandığı yerlerdir. Bu nedenle, camilerde iş sağlığı ve güvenliği konusundaki eksikliklerin hem bireysel hem de toplumsal boyutta geniş etkileri olabilir. Camilerdeki İSG uygulamaları, elektrik sistemlerinden yapısal güvenlik önlemlerine, yangın risklerinden ergonomik çalışma koşullarına kadar geniş bir kapsamda değerlendirilir. Bu alanlarda alınması gereken önlemler, hem ziyaretçilerin hem de çalışanların güvenliğini sağlamak açısından kritik rol oynar. Örneğin, elektrik sistemlerinde meydana gelebilecek bir arıza veya elektrik kaçağı, yangın riskini artırabilir ve insan sağlığına doğrudan zarar verebilir. Bu gibi risklerin önlenmesi için elektrik tesisatlarının düzenli olarak kontrol edilmesi ve bakım işlemlerinin aksatılmaması gerekir. Ayrıca, yangın söndürme ekipmanlarının cami içinde kolayca erişilebilir yerlere konumlandırılması ve tahliye yollarının açık tutulması, acil durumlarda güvenliğin sağlanmasına katkı sağlar. Camilerde iş sağlığı ve güvenliğinin sağlanması, yüksekten çalışma gibi risk taşıyan faaliyetler için alınacak önlemleri de kapsar. Özellikle temizlik, bakım ve onarım çalışmaları sırasında kullanılan merdivenler veya yüksekte çalışma ekipmanlarının güvenli olması önemlidir. Düşme veya yaralanma riskini azaltmak için merdivenlerin sabitlenmesi ve korkuluklarla desteklenmesi gibi önlemler alınmalıdır. Yüksekte çalışan personelin kişisel koruyucu donanımlar (KKD) kullanması ve gerekli eğitimleri alması da İSG açısından hayati bir gerekliliktir. Böylece yüksekten düşme sonucu yaşanabilecek kazaların önüne geçilmiş olur. İSG uygulamalarında çalışanların ve ibadet edenlerin güvenliğini artırmak için yapılan risk değerlendirmesi, camilerde olası tehlikelerin belirlenmesi adına önemli bir adımdır. Risk değerlendirmesi sayesinde, camide karşılaşılabilecek tehlikeler tanımlanır, bu risklerin hangi alanlarda yoğunlaştığı analiz edilir ve gerekli önlemler planlanır. İSG eğitimlerinin çalışanlara düzenli olarak verilmesi de uzun vadeli güvenlik sağlama açısından oldukça önemlidir. İlk yardım, yangın güvenliği, tahliye prosedürleri ve güvenli çalışma teknikleri gibi konuların işlendiği bu eğitimler, çalışanların acil durumlarda daha güvenli hareket etmelerini sağlar. Örneğin, yangın durumunda hızlı ve güvenli bir şekilde tahliye yapılabilmesi için çalışanların belirli aralıklarla tahliye tatbikatlarına katılması önemlidir. Hijyen kurallarının sağlanması ve düzenli sağ-

lık kontrollerinin yapılması, camilerde iş sağlığı ve güvenliğinin önemli bir parçasıdır. Toplum sağlığı açısından hijyenin korunması, salgın hastalıkların yayılmasını önlemek ve ibadet edenlerin sağlıklı bir ortamda bulunmalarını sağlamak adına kritiktir. Özellikle cami temizliği sırasında uygun temizlik malzemelerinin kullanılması ve dezenfeksiyon işlemlerinin düzenli olarak yapılması, sağlık açısından olumlu sonuçlar doğurur. Ayrıca camide görevli personelin sağlık kontrollerinin düzenli yapılması, hem kendi sağlıklarını korumak hem de toplum sağlığını riske atmamak açısından önem taşır. Sonuç olarak, camilerde iş sağlığı ve güvenliği önlemlerinin uygulanması, toplumsal güvenliği ve sağlık standartlarını artıran bir etkiye sahiptir. Cami içinde alınan önlemler, hem ibadet edenler hem de cami çalışanları için güvenli bir ortam sağlamayı hedefler. Bu önlemler, toplumda camilerin güvenli ve sağlıklı ortamlar olarak sürdürülebilirliğine katkı sağlar. İş sağlığı ve güvenliği bilincinin cami çalışanları ve ziyaretçiler arasında artırılması, toplumsal güvenlik açısından büyük önem taşır. Dolayısıyla, camilerde İSG uygulamaları sadece bireysel güvenliği değil, aynı zamanda toplumsal dayanışmayı ve sağlıklı yaşam standartlarını destekleyen bir bütün olarak değerlendirilmelidir.

CAMİİ PERSONELİ

Cami personeli, cami hizmetlerinin düzenli ve güvenli bir şekilde yürütülmesinden sorumlu olan görevlilerden oluşur. Bu personel genellikle aşağıdaki görevleri üstlenen kişilerden meydana gelir:

İmam: Camide cemaatle namaz kıldıran, vaaz ve dini bilgiler veren görevlidir. İmam, cemaati bilgilendirme, manevi rehberlik yapma ve ibadetlerin düzenlenmesinden sorumludur.

Müezzin-Kayyım: Namaz vakitlerinde ezan okumak, ibadet sırasında imamın yanında yardımcı olmak ve caminin temizlik ve düzeniyle ilgilenmekle görevli personeldir. Müezzin-kayyımlar, caminin genel işleyişini destekleyici görevlerde bulunur.

Vaiz: Belli camilerde görev alan, cemaate cuma ve bayram namazlarında hutbe okuyan ve çeşitli konularda dini vaazlar veren kişidir. Vaizler, İslam hakkında bilgilendirme yaparak cemaatin dini bilgisini artırır.

Cami Hizmetlileri (Hademeler): Cami içi ve çevresinin temizliğinden, bakımından ve düzeninden sorumlu olan personele denir. Cami hizmetlileri, caminin hijyen koşullarını sağlayarak sağlıklı bir ibadet ortamının devamını sağlar.

Güvenlik Görevlileri: Bazı büyük camilerde güvenlikten sorumlu personel bulunur. Bu kişiler, ibadet sırasında güvenliği sağlamak ve camiyi korumakla görevlidir.

Bunların yanı sıra bazı camilerde özel etkinlikler ve sosyal faaliyetler için geçici veya ek görevli kişiler de çalışabilir. Cami personelinin her bir üyesi, caminin güvenli, temiz ve düzenli bir ibadet ortamı sağlamasında önemli bir role sahiptir.

NİTEL ARAŞTIRMA YÖNTEMİ

Örneklem ve Veri Toplama

Bu çalışmada camilerde iş sağlığı ve güvenliği (İSG) uygulamalarını incelemek, mevcut durumu değerlendirmek ve potansiyel riskleri belirlemek amacıyla nitel araştırma yöntemi kullanılmıştır. Nitel araştırma, derinlemesine anlayış geliştirmeyi amaçlar ve çeşitli verileri toplama ve analiz etme yöntemlerini içerir. Camilerdeki İSG uygulamaları, yalnızca işyerinde karşılaşılan riskleri değil, aynı zamanda camilerin sosyokültürel bağlamını, inançsal işleyişini ve toplumsal etkileşimi de göz önünde bulundurur. Bu bağlamda, camilerdeki iş sağlığı ve güvenliği ile ilgili mevcut durumun analiz edilmesi için kapsamlı bir literatür taraması yapılmıştır. Bu tarama, fiziksel, biyolojik, kimyasal, ergonomik ve psikososyal riskler gibi farklı boyutları ele alacak şekilde geniş bir çerçevede gerçekleştirilmiştir. Araştırma örneklemi, camilerin genel yapısı, çalışan profilleri ve camilerde gerçekleştirilen faaliyet türlerine dayanarak belirlenmiştir. Camilerde çalışan personel, imamlar, temizlik görevlileri, güvenlik personeli ve bakımdan sorumlu teknik ekip gibi farklı meslek gruplarından oluşmaktadır. Ayrıca, camilerde ibadet eden bireylerin güvenliğini de göz önünde bulundurmak amacıyla caminin tüm iç ve dış alanları dikkate alınmıştır. Bununla birlikte, çalışmada doğrudan saha araştırması yapılmamış, ikincil veri kaynakları üzerinden bilgi toplanmıştır. İkincil veri kaynakları arasında Türkiye'deki camilerle ilgili yasal düzenlemeler ve raporlar (örneğin, Diyanet İşleri Başkanlığı'nın yayınları), akademik araştırmalar, İSG ile ilgili yapılan saha çalışmaları ve camilerde karşılaşılan riskleri ele alan araştırmalar bulunmaktadır. Veri toplama sürecinde, camilerdeki iş sağlığı ve güvenliği uygulamaları ve bu konudaki mevcut yasal düzenlemeler dikkate alınarak, ilgili raporlar, yönetmelikler ve camilerde yapılan denetimlere ait veriler incelenmiştir. Bu sayede camilerdeki güvenlik önlemleri, riskler ve eksiklikler hakkında bilgi edinilmiştir. Ayrıca, alanında uzmanlaşmış kişilerin görüşlerinden de yararlanılmıştır. Uzman görüşleri, camilerdeki İSG risklerinin daha iyi anlaşılmasına ve mevcut önlemlerin değerlendirilmesine olanak tanımıştır. Bu veriler, camilerdeki İSG uygulamalarının iyileştirilmesi için somut ve uygulanabilir öneriler geliştirmeye yardımcı olmuştur.

Veri Analizi

Toplanan veriler, içerik analizi yöntemi ile değerlendirilmiştir. İçerik analizi, verilerin sistematik bir şekilde kategorize edilmesini ve bu kategoriler arasındaki ilişkilerin belirlenmesini sağlayan bir analiz tekniğidir. Çalışmada elde edilen veriler, camilerdeki İSG uygulamalarına dair risk faktörlerini belirlemek ve bu risklerin etkilerini analiz etmek için kullanılmıştır. Elektrik çarpması, kayma/düşme, hijyen eksiklikleri, yüksekten çalışma gibi riskler, İSG perspektifinden detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. İçerik analizinde, her bir risk faktörü, camilerde karşılaşılan spesifik tehlikeler ve mevcut önlemler ile ilişkili olarak ele alınmıştır. Örneğin, camilerdeki elektrik sistemlerinin düzenli kontrol edilmemesi, yangın riskini artırabileceği gibi, hijyen eksiklikleri de sağlık sorunlarına yol açabilir. Bu tür riskler, cami ortamına özgü faktörler göz önünde bulundurularak incelenmiştir. Ayrıca, camilerdeki İSG uygulamaları ile genel iş sağlığı ve güvenliği standartlarının ne derece örtüştüğü tartışılmış, eksiklikler belirlenmiş ve bu eksikliklerin giderilmesine yönelik öneriler geliştirilmiştir. İçerik analizinde, yasal düzenlemeler ve akademik literatürdeki örnekler karşılaştırmalı bir şekilde incelenmiştir. Bu karşılaştırmalar, camilerdeki mevcut İSG uygulamalarının etkinliğini değerlendirmeye ve iyileştirme alanlarını tespit etmeye yardımcı olmuştur. Ayrıca, camilerde karşılaşılan İSG risklerinin çözülmesi için uygulanabilir stratejiler belirlenmiştir.

Gerekçe

Camiler, fiziksel ve işlevsel açıdan diğer çalışma ortamlarından farklı özelliklere sahip olan kutsal mekânlar olduğundan, burada uygulanması gereken iş sağlığı ve güvenliği (İSG) standartları genellikle diğer işyerlerinden farklılık gösterir. Camilerde çalışan personel ve ibadet eden bireyler için uygun İSG önlemleri almak, toplumsal sağlık ve güvenliği artırmak için kritik öneme sahiptir. Ancak camilerde iş sağlığı ve güvenliği konusundaki bilgilerin genellikle yetersiz olduğu ve mevcut İSG uygulamalarının camilere özgü koşullara tam anlamıyla uyarlanmadığı görülmektedir. Bu durum, camilerdeki İSG uygulamalarının daha etkin hale getirilmesini gerektirmektedir. Bu sebeple, literatüre dayalı bir nitel araştırma yöntemi seçilmiştir. Literatür taraması, camilere özgü risklerin geniş bir perspektifte ele alınmasına imkân tanımaktadır. Ayrıca içerik analizi, bu risklerin cami çalışanları ve ibadet edenler açısından nasıl bir tehdit oluşturduğunu anlamamıza yardımcı olurken, mevcut uygulamaların iyileştirilmesi için somut öneriler geliştirmeye olanak sağlamıştır. Bu yöntem, camilerdeki İSG uygulamalarının mevcut durumunu daha iyi anlayarak, cami ortamındaki risklere özgü çö-

züm önerileri üretmeyi hedeflemektedir. Sonuç olarak, yapılan bu araştırma, camilerde iş sağlığı ve güvenliği alanında bilinçli adımlar atılmasını sağlayacak ve toplumsal güvenliği artıracak öneriler geliştirmeyi amaçlamaktadır.

BULGULAR

Araştırmalar, camilerde iş sağlığı ve güvenliği (İSG) uygulamalarının yeterli düzeyde olmadığını ve bu durumun hem çalışanlar hem de cemaat açısından çeşitli riskler barındırdığını ortaya koymaktadır (Çalışkan, 2020). Özellikle elektrik, yangın, yüksekte çalışma, ergonomi, biyolojik ve psikososyal risklerin yaygın olduğu tespit edilmiştir.

Elektrik ve Yangın Güvenliği

Camilerde elektrik ve yangın güvenliği, hem çalışanlar hem de ibadet edenler için kritik öneme sahiptir. Elektrik tesisatlarının düzenli bakımı yapılmadığı takdirde, elektrik çarpması ve yangın gibi ciddi kazaların riski artmaktadır. Aksu'ya (2020) göre, özellikle eski camilerde elektrik tesisatlarının güncel standartlara uygun olmaması, elektriksel arızaların ve kısa devrelerin meydana gelmesine neden olabilir. Bu durum, hem yapıdaki eski tesisatın yıpranmasından hem de modern güvenlik önlemlerinin eksik olmasından kaynaklanmaktadır. Bu tür yapılar, zamanla aşınmış elektrik kabloları ve hatalı bağlantılar nedeniyle yüksek yangın riski taşır. Ayrıca, modern yangın güvenliği ekipmanlarının bulunmaması, yangının yayılmasını hızlandırabilir. Yangın güvenliği açısından, camilerde yangın söndürme tüplerinin bulundurulması büyük bir önem taşır. Kara'ya (2019) göre, yangın söndürme tüplerinin stratejik noktalarda yerleştirilmesi, acil durumlarda hızlı müdahale sağlamak için gereklidir. Camilerin büyük iç alanları ve kalabalık yapısı göz önünde bulundurulduğunda, yangın anında etkili bir tahliye planı oluşturulması gerektiği vurgulanmaktadır. Acil durum tahliye planlarının, özellikle caminin her noktasına kolayca ulaşılabilecek şekilde tasarlanması, yangın anında paniği azaltarak insanların güvenli bir şekilde dışarı çıkmalarını sağlar. Ayrıca, yangın tatbikatları düzenlenerek cami çalışanlarının ve cemaatin bu tür durumlar karşısında nasıl hareket etmeleri gerektiği konusunda eğitilmeleri sağlanmalıdır. Özetle, camilerde elektrik ve yangın güvenliği konusunda alınacak önlemler, sadece cami çalışanlarını değil, aynı zamanda ibadet edenleri de koruyacak şekilde kapsamlı olmalıdır. Elektrik tesisatlarının düzenli bakımı ve güncellenmesi, yangın söndürme ekipmanlarının bulundurulması ve etkili tahliye planlarının oluşturulması, camilerin güvenliğini sağlayan temel unsurlar arasında yer almaktadır

Yüksekte Çalışma

Camilerde yüksekte çalışma, aydınlatma sistemlerinin bakımı, minarelerin temizliği gibi görevlerde sıklıkla karşılaşılan bir durumdur. Bu tür çalışmalar, özel güvenlik önlemleri ve doğru ekipman kullanımını gerektirir. Şahin (2018), yaptığı araştırmalarla yüksekte yapılan işlerde kullanılan ekipmanların genellikle yetersiz olduğunu ve bu durumun çalışanların güvenliğini tehlikeye attığını ortaya koymuştur. Özellikle eski camilerde, minarelerin yüksekliği ve yapısal özellikleri nedeniyle, iş güvenliği önlemleri ihmal edilebilir. Bu da, düşme riski gibi ciddi kazaların yaşanmasına yol açabilir. Düşme riskini en aza indirmek için, kişisel koruyucu donanımların (KKD) kullanılması son derece önemlidir. Yıldırım (2019) ise yüksekte çalışma yapan personelin, doğru KKD'leri kullanmasının yanı sıra, bu tür çalışmalarla ilgili eğitimler almasının da gerekliliğini vurgulamaktadır. Yüksekte çalışma eğitimi, çalışanların güvenli bir şekilde çalışabilmeleri için kritik bir rol oynar. Bu eğitimler, özellikle halatlar, iskeleler ve diğer güvenlik ekipmanlarının doğru bir şekilde nasıl kullanılacağını öğretir. Ayrıca, bu eğitimlerde düşme durumlarında yapılması gerekenler, acil yardım yöntemleri ve güvenli çalışma teknikleri de yer alır.

Biyolojik Riskler

Camilerde büyük toplulukların bir araya gelmesi, biyolojik risklerin artmasına yol açabilir. Özellikle enfeksiyon hastalıklarının yayılma riski, hijyen koşullarının yetersiz olduğu camilerde daha fazladır. Öztürk (2021), camilerdeki yoğun cemaatin, özellikle solunum yoluyla bulaşan hastalıkların yayılmasına zemin hazırlayabileceğini belirtmektedir. Camilerde düzenli olarak temizlik yapılması ve hijyen koşullarının sağlanması, bu tür biyolojik risklerin en aza indirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Hijyen standartlarının düşük olduğu camilerde, mikroorganizmaların hızla yayılması mümkündür. Bu durum, özellikle kış aylarında artan soğuk algınlığı, grip gibi enfeksiyonların cami içerisinde daha hızlı bir şekilde yayılmasına neden olabilir. Bu nedenle, cami temizlik ve bakımının düzenli olarak yapılması, halıların, avizelerin, lavaboların ve diğer ortak kullanım alanlarının dezenfekte edilmesi gerekmektedir. Ayrıca, cemaatin ve cami personelinin kişisel hijyenine dikkat etmesi, ellerini sık sık yıkaması gibi basit önlemlerle de biyolojik riskler azaltılabilir. Öztürk (2021), dezenfeksiyon uygulamalarının camilerde rutin hale getirilmesinin, enfeksiyonların yayılmasını engellemede etkili olacağını vurgulamaktadır. Camilerdeki ortak alanların düzenli dezenfekte edilmesi, mikropların yayılmasını engellemek ve cami içinde sağlıklı bir ibadet ortamı oluşturmak adına büyük önem taşır.

Ergonomi ve Fiziksel Riskler

Camilerdeki mobilya yerleşimleri ve çalışma alanlarının ergonomik olmaması, cami personelinin fiziksel sağlığını tehdit eden önemli bir risk faktörüdür. Demir (2021) tarafından yapılan bir araştırmaya göre, ergonomik olmayan çalışma koşulları, çalışanların uzun süreli kullanım sonucu kas-iskelet sistemi rahatsızlıkları yaşamasına yol açabilir. Özellikle camilerdeki temizlik, düzenleme ve bakım gibi görevlerde, personelin sürekli olarak eğilerek veya yanlış pozisyonlarda çalışması, bel, boyun ve sırt ağrılarına neden olabilir. Bu durum, zamanla daha ciddi sağlık sorunlarına, hatta kalıcı hasarlara yol açabilir. Ergonomik düzenlemelerin yapılması, çalışanların sağlığını korumak açısından büyük önem taşır. Çalışma alanlarındaki mobilyaların ve ekipmanların uygun şekilde yerleştirilmesi, çalışanların fiziksel yükünü hafifletir ve sağlıklarını korur. Örneğin, temizlik işlerinde kullanılan araçların ağırlığının azaltılması veya uzun süreli eğilme gerektiren görevler için uygun yüksekliğe sahip araçların kullanılması, çalışanların kas-iskelet sistemi üzerindeki olumsuz etkileri azaltır. Ayrıca, düzenli aralıklarla yapılan esneme hareketleri ve işyerinde ergonomik eğitimlerin verilmesi, çalışanların sağlıklı bir şekilde görevlerini yerine getirmelerini sağlar.

Kimyasal Riskler

Camilerde temizlik ve dezenfeksiyon işlemleri için kullanılan kimyasal ürünler, çalışanlar için önemli bir sağlık riski oluşturmaktadır. Özellikle, dezenfektanlar, temizlik maddeleri ve diğer kimyasalların yanlış kullanımı veya depolanması, zehirlenme, cilt yanıkları, alerjik reaksiyonlar ve solunum yolu hastalıkları gibi sağlık sorunlarına yol açabilir (Balcı, 2022). Kimyasal maddelerin yanlış karıştırılması veya aşırı kullanımı, bu maddelerin etkisini güçlendirebilir ve ciddi sağlık sorunlarına neden olabilir. Bunun yanı sıra, bu kimyasalların havaya yayılabileceği ve özellikle solunum yoluyla vücuda girebileceği durumlar, cami çalışanları ve cemaatin sağlığı için büyük bir tehdit oluşturur. Camilerdeki temizlik süreçlerinde, genellikle hijyen sağlamak amacıyla kullanılan güçlü kimyasallar, etkili olmasına karşın dikkatli ve doğru şekilde kullanılmazlarsa zehirlenme veya alerjik reaksiyon risklerini artırabilir. Örneğin, klor bazlı dezenfektanlar, solunduğunda solunum yollarını tahriş edebilir ve cilt ile teması sonucu alerjik reaksiyonlar ve yanıklara neden olabilir. Temizlik maddelerinin uygun şekilde karıştırılmaması, zehirli gazların açığa çıkmasına yol açabilir (Balcı, 2022). Bu risklerin azaltılması için, cami personeline kimyasal ürünlerin güvenli kullanımı ve depolanması konusunda eğitim verilmesi büyük önem taşır. Eğitimler, kimyasal ürünlerin etiketlerinin okunması, doğru miktarlarda kullanımı, karıştırılmaması gereken ürünlerin belirlenmesi ve ürünlerin güvenli bir şekilde saklanması gibi konu-

ları kapsamalıdır. Ayrıca, cami içinde kimyasal maddelerin depolanacağı alanların, sıcaklık ve nem gibi çevresel koşullar göz önünde bulundurularak uygun şekilde tasarlanması gerekmektedir. Kimyasal maddelerin kullanımı sırasında kişisel koruyucu donanımların (KKD) kullanımı, özellikle eldiven, maske ve gözlük gibi ekipmanların temin edilmesi, çalışanların sağlık güvenliğini sağlayacaktır. Kimyasal risklerin etkili bir şekilde yönetilmesi, sadece cami çalışanlarının sağlığını korumakla kalmaz, aynı zamanda cami içinde hijyenin ve güvenliğin sağlanması açısından da büyük bir önem taşır. Bu doğrultuda, cami yönetimlerinin, temizlik personeline kimyasal güvenlik ve hijyen konusunda düzenli eğitimler sunması ve bu eğitimlerin pratik uygulamalarla desteklenmesi gerekmektedir. Eğitimler, personelin doğru temizlik ürünlerini seçmesini, bu ürünleri güvenli bir şekilde kullanmasını ve sonrasında uygun şekilde depolamasını sağlamalıdır.

Psikososyal Riskler

Camilerde çalışanlar, hem dini hizmetler hem de caminin günlük işleyişine yönelik farklı görevlerde bulunurlar. Ancak bu yoğun çalışma ortamı, çalışanların stres, iş yükü ve sosyal ilişkilerden kaynaklanan psikososyal risklerle karşı karşıya kalmalarına neden olabilir. Ulaş (2021), yaptığı araştırmada camilerde çalışan personelin, özellikle aşırı iş yükü, zaman baskısı ve düşük sosyal destek gibi faktörlerden dolayı yüksek stres seviyelerine maruz kaldığını belirtmiştir. Bu psikososyal riskler, çalışanların motivasyonunu ve iş verimliliğini olumsuz yönde etkileyebilir, ayrıca uzun vadede tükenmişlik sendromu gibi psikolojik sorunlara yol açabilir. Stres, cami çalışanlarının hem fiziksel hem de mental sağlığını tehdit eden önemli bir faktördür. Özellikle camilerin yoğun zamanlarda, örneğin bayram ve cuma namazlarında daha fazla insanın katılım gösterdiği dönemde, personelin üzerindeki iş yükü artar. Bu, çalışanların hem fiziki hem de duygusal açıdan tükenmelerine yol açabilir. Ayrıca, çalışanlar arasındaki sosyal ilişkiler, psikososyal riskleri artırabilir. Cami personelinin birbirine yeterince destek olmaması veya iletişimsizlik gibi durumlar, stresin daha da büyümesine neden olabilir. Ulaş (2021), destekleyici bir çalışma ortamının sağlanmasının, bu psikososyal risklerin azaltılmasında etkili olacağını vurgulamaktadır. Çalışanlar arasındaki iletişimin güçlendirilmesi, iş yükünün dengelenmesi ve psikolojik destek hizmetlerinin sunulması, stresin azaltılması için alınabilecek önlemler arasında yer alır. Ayrıca, cami yönetiminin çalışanlarına yönelik empatik bir yaklaşım benimsemesi, onların moral ve motivasyonunu artırarak iş verimliliğini de yükseltebilir.

Eğitim ve Bilinçlendirme Eksiklikler:

Eğitim ve bilinçlendirme programlarının uygulanması büyük önem taşımaktadır. Çetin (2022), camilerde iş sağlığı ve güvenliği (İSG) eğitimlerinin düzenli olarak yapılmamasının, çalışanların işyerindeki potansiyel riskler hakkında yeterli bilgiye sahip olmamalarına yol açtığını belirtmektedir. Bu durum, iş kazalarının önlenmesi ve çalışan sağlığının korunması açısından ciddi bir tehdit oluşturur. Ayrıca, risk değerlendirme süreçlerinin standart hale getirilmemesi, camilerdeki iş güvenliği önlemlerinin düzensiz ve etkisiz olmasına neden olmaktadır. Çetin (2022), camilerdeki İSG risklerinin belirlenmesi ve bu risklere yönelik önleyici tedbirlerin alınması için sistematik bir yaklaşımın önemini vurgulamaktadır. Güvenlik ekipmanlarının eksikliği de camilerdeki iş sağlığı ve güvenliği uygulamalarında karşılaşılan başka bir önemli sorundur. Güvenlik ekipmanlarının doğru ve yeterli düzeyde temin edilmemesi, çalışanların tehlikelere karşı korunmasız kalmasına neden olabilir. Bu eksikliklerin giderilmesi için kapsamlı eğitim ve bilinçlendirme programları uygulanmalıdır. Bu programlar, cami personelini iş sağlığı ve güvenliği konusunda bilinçlendirerek, potansiyel tehlikeler hakkında bilgi sahibi olmalarını sağlar. Ayrıca, eğitimlerde doğru güvenlik ekipmanlarının kullanımı, acil durum yönetimi ve risk değerlendirmesi gibi önemli konulara da yer verilmelidir. Eğitim ve bilinçlendirme programları, sadece cami çalışanlarının değil, aynı zamanda cemaatin de güvenli bir ibadet ortamında bulunmalarını sağlamaya yönelik olmalıdır. İSG kültürünün oluşturulması, cami çalışanlarının ve cemaatin güvenli bir şekilde vakit geçirmesini ve olası kazaların önlenmesini sağlar.

TARTIŞMA

Camilerde iş sağlığı ve güvenliği (İSG) uygulamalarının yeterliliği, sadece çalışanların değil, aynı zamanda cemaatin de sağlık ve güvenliğini doğrudan etkileyen kritik bir unsurdur. İSG, özellikle camilerdeki büyük topluluklar ve farklı işlevlerin bir arada yürütülmesi nedeniyle daha büyük bir önem taşır. Bu çalışma, camilerdeki mevcut İSG uygulamalarının çeşitli eksikliklerini ele alarak, bu eksikliklerin giderilmesi için alınması gereken önlemleri tartışmaktadır. Elektrik ve Yangın Riskleri araştırmalar, camilerdeki elektrik tesisatlarının genellikle düzenli bakım ve kontrollerden yoksun olduğunu göstermektedir (Aksu, 2020). Eski yapılar ve modernize edilmemiş elektrik altyapıları, potansiyel elektrik çarpması ve yangın gibi ciddi risklere yol açabilir. Camilerde genellikle yoğun cemaat katılımının olduğu zamanlarda elektriksel arızaların, kısa devrelerin veya yangınların ortaya çıkma olasılığı artmaktadır. Ayrıca, elektrik tesisatlarının bakımsız olması, bu tür risklerin gerçekleşmesini hızlandırabilir. Yangın güvenliği açısından da benzer eksiklikler mevcuttur. Kara

(2019), camilerdeki yangın söndürme ekipmanlarının yetersiz olduğunu veya yanlış kullanıldığını belirtmektedir. Özellikle yangın tüplerinin periyodik olarak kontrol edilmemesi, çalışanların ve cemaatin güvenliğini tehlikeye atmaktadır. Bu bağlamda, cami yönetimlerinin yangın güvenliği konusunda daha bilinçli hale getirilmesi, düzenli eğitimlerin verilmesi ve yangın güvenliği ekipmanlarının düzenli olarak denetlenmesi gerekmektedir. Yangın tatbikatlarının yapılması, personelin yangın anında nasıl hareket etmeleri gerektiği konusunda bilinçli olmasını sağlar. Yüksekte Çalışma ve Ergonomik Riskler camilerdeki yüksekte çalışma, genellikle aydınlatma sistemlerinin bakımı, minarelerin temizliği gibi işlerde karşımıza çıkmaktadır. Bu tür çalışmalarda kullanılan ekipmanların genellikle yetersiz olduğu ve çalışanların uygun eğitimlerden geçmediği tespit edilmiştir (Şahin, 2018). Yüksekte çalışma sırasında düşme riskinin artması, iş kazalarının başlıca sebeplerindendir. Ayrıca, cami personelinin fiziksel iş yükü, özellikle temizlik ve düzenleme işlemlerinde, genellikle ergonomik olmayan koşullarda gerçekleştirilmekte ve bu durum kas-iskelet sistemi rahatsızlıklarına yol açabilmektedir (Yıldırım, 2019). Ergonomik düzenlemelerin yapılması, çalışanların sağlığını korumak açısından son derece önemlidir. Çalışanların yüksekte çalışma konusunda eğitilmesi, uygun güvenlik ekipmanlarının temin edilmesi ve ergonomik düzenlemeler yapılması, bu risklerin azaltılmasına katkı sağlayabilir. Özellikle minarelerdeki temizlik ve bakım işlerinde kullanılan güvenli tırmanma ekipmanlarının önemi büyüktür. Biyolojik ve Kimyasal Riskler camilerde büyük toplulukların bir araya gelmesi, biyolojik risklerin artmasına neden olmaktadır. Özellikle pandemi dönemlerinde, hijyen standartlarının yetersizliği enfeksiyon riskini ciddi şekilde artırmıştır (Öztürk, 2021). Camilerdeki ortak alanlar, cemaatin yoğun katılımıyla mikropların ve enfeksiyonların hızla yayılabileceği ortamlara dönüşebilir. Temizlik sırasında kullanılan kimyasalların uygun şekilde depolanmaması ve kullanılması da başka bir sağlık riskidir. Balcı (2022), camilerde kullanılan temizlik kimyasallarının yanlış kullanımı veya yanlış depolanmasının, sağlık üzerinde olumsuz etkiler yaratabileceğini ifade etmektedir. Bu nedenle, cami personeline hijyen ve kimyasal güvenliği konusunda eğitim verilmesi ve temizlik kimyasallarının güvenli bir şekilde depolanması gerekmektedir. Ayrıca, caminin sık kullanılan alanlarının, özellikle lavaboların ve abdesthanelerin düzenli dezenfekte edilmesi, enfeksiyonların yayılmasını önleyecektir. Psikososyal Riskler camilerde çalışan personel, genellikle yüksek iş yükü ve sosyal destek eksiklikleri gibi psikososyal risklere maruz kalmaktadır. Çalışanlar, zaman zaman stres, iş tatminsizliği ve düşük motivasyon gibi psikolojik sorunlarla karşılaşabilirler (Ulaş, 2021). Özellikle yoğun dönemlerde cami personelinin üzerinde baskı oluşabilir ve bu da hem iş performansını hem de kişisel sağlıklarını olumsuz etkileyebilir.

Psikososyal risklerin yönetilmesi, sadece çalışanların sağlığını değil, aynı zamanda iş verimliliğini de artırır. Bu bağlamda, destekleyici bir çalışma ortamının sağlanması, çalışanların stres seviyelerinin azaltılması ve motivasyonlarının artırılması için çok önemlidir. Psikososyal destek programlarının uygulanması, çalışanların genel refahını iyileştirebilir ve işyerindeki ilişkilerin güçlenmesine katkı sağlayabilir.Eğitim ve Bilinçlendirme Eksiklikleri İSG uygulamalarının başarısız olmasının en büyük nedenlerinden biri, çalışanların ve yöneticilerin bu konudaki farkındalık düzeyinin düşük olmasıdır (Çetin, 2022). Camilerde İSG uygulamaları, genellikle teorik bilgilere dayansa da pratikte yetersiz kalmaktadır. Çalışanlar, güvenlik ekipmanlarını doğru bir şekilde kullanamamakta ve acil durumlara müdahalede eksiklikler yaşanmaktadır. Bu eksikliklerin giderilmesi için İSG eğitimlerinin düzenli olarak yapılması ve pratik uygulamalarla desteklenmesi gerekmektedir. Eğitim programları, sadece cami personelini değil, aynı zamanda cemaatin de güvenli bir ibadet ortamında bulunmalarını sağlamaya yönelik olmalıdır. Ayrıca, risk değerlendirmelerinin standart hale getirilmesi ve düzenli denetimlerin yapılması, İSG kültürünün yerleşmesine yardımcı olabilir.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Camiler, sadece dini ibadetlerin yapıldığı alanlar değil, aynı zamanda toplumsal dayanışmanın, sosyal etkileşimin ve kültürel değerlerin bir araya geldiği mekânlardır. Bu nedenle, camilerde iş sağlığı ve güvenliği (İSG) uygulamalarının eksiksiz bir şekilde yerine getirilmesi, hem cami çalışanlarının hem de ibadet edenlerin fiziksel ve ruhsal refahını koruma açısından kritik bir öneme sahiptir. Ancak, yapılan analizler ve mevcut İSG uygulamaları ile ilgili yapılan değerlendirmeler, camilerdeki İSG uygulamalarının birçok açıdan yetersiz olduğunu göstermektedir. Elektrik tesisatlarının bakımsızlığı, yüksekte çalışma sırasında alınmayan güvenlik önlemleri, hijyen standartlarının eksikliği, temizlik kimyasallarının yanlış kullanımı ve psikososyal risklerin göz ardı edilmesi gibi sorunlar, cami çalışanlarını ve ibadet edenleri ciddi tehlikelerle karşı karşıya bırakmaktadır. İSG'nin önemine dair farkındalığın artmaması, cami çalışanlarının iş güvenliği konusunda yetersiz eğitim alması, bu risklerin ve sorunların artmasına neden olmaktadır. Çalışanlar, temizlik, bakım ve onarım gibi temel işlerde genellikle yeterli eğitim ve donanım olmadan çalışmaktadırlar. Ayrıca, cami cemaatinin cami içinde geçirdiği zaman dilimi boyunca, özellikle yoğun zamanlarda (Cuma namazı, bayramlar vb.), hijyen ve güvenlik tedbirlerinin eksikliği nedeniyle biyolojik risklerin yanı sıra, yangın ve elektrikle ilgili kazaların yaşanma olasılığı artmaktadır. Cami personelinin ruhsal ve psikolojik sağlığı da dikkate alındığında, stres, motivasyon düşüklüğü ve iş tatminsizliği gibi psikososyal riskler de

önemli bir sorun olarak ortaya çıkmaktadır. Bu durum, çalışanların genel iş verimliliğini düşürmekte ve görevlerini sağlıklı bir şekilde yerine getirmelerini engellemektedir. Bu bağlamda, camilerdeki iş sağlığı ve güvenliği uygulamalarının iyileştirilmesi, sadece çalışanların güvenliğini artırmakla kalmayacak, aynı zamanda ibadet edenlerin de sağlığını koruyacak ve camilerin toplumsal güvenliğini güçlendirecektir.

Mevcut İSG uygulamalarındaki eksikliklerin giderilmesi için aşağıdaki adımlar atılmalıdır:

İSG Farkındalığının Artırılması: Camii yönetimlerinin ve çalışanlarının iş sağlığı ve güvenliği konusundaki farkındalık seviyeleri artırılmalıdır. Çalışanlara yönelik düzenli eğitim programları ve seminerler, İSG bilincinin yerleşmesine yardımcı olacaktır. Cami yöneticilerinin İSG konusunda liderlik yapması, güvenli çalışma ortamlarının oluşturulmasında etkili olacaktır.

Risk Analizi ve Risk Değerlendirme ve Denetim Süreçlerinin Güçlendirilmesi: Camilerdeki mevcut İSG riskleri, düzenli olarak değerlendirilmelidir. Elektrik tesisatlarının, yangın güvenliğinin, hijyen koşullarının ve ergonomik düzenlemelerin periyodik denetimleri yapılmalıdır. Ayrıca, bu değerlendirmelere göre önlem planları oluşturulmalı ve uygulamaya konulmalıdır. Her türlü olumsuz durum için acil müdahale ve tahliye planları hazırlanmalıdır.

Eğitim Programlarının Güçlendirilmesi: Camilerdeki personelin hem teorik hem de pratik eğitim alması sağlanmalıdır. Elektrik güvenliği, yangın tatbikatları, yüksekte çalışma güvenliği ve hijyen eğitimlerinin düzenli aralıklarla verilmesi, çalışanların güvenlik ekipmanlarını doğru kullanabilmesi ve acil durumlarda nasıl davranacakları konusunda hazırlıklı olmalarını sağlayacaktır. Ayrıca, hijyen ve kimyasal güvenlik alanlarında da eğitimler verilmeli, temizlik malzemelerinin doğru kullanımı ve depolanması konusunda çalışanlar bilgilendirilmelidir.

Ergonomik Düzenlemeler ve Fiziksel Güvenlik İyileştirmeleri: Camilerdeki çalışma ortamları, çalışanların fiziksel sağlığını koruyacak şekilde düzenlenmelidir. Özellikle temizlik, düzenleme ve bakım gibi fiziksel işlerin daha ergonomik hale getirilmesi, kas-iskelet sistemi rahatsızlıklarının önüne geçecektir. Ayrıca, yüksekte çalışma yapan personel için gerekli güvenlik önlemleri alınmalı, güvenli ekipmanlar sağlanmalı ve düzenli eğitimler verilmelidir.

Psikososyal Destek Programlarının Uygulanması: Camii personelinin ruhsal ve psikolojik sağlığı da göz önünde bulundurulmalıdır. Stres, motivasyon eksik-

liği ve iş tatminsizliği gibi psikososyal risklere karşı çalışanlara destek sağlayacak programlar uygulanmalıdır. Bu, çalışanların hem fiziksel hem de ruhsal olarak daha sağlıklı bir ortamda çalışmasını sağlayacak, iş verimliliğini artıracaktır.

Toplumsal Güvenlik ve İSG Kültürünün Yaygınlaştırılması: Camilerde alınacak İSG önlemleri yalnızca çalışanları değil, aynı zamanda camiyi ziyaret eden cemaatin de güvenliğini sağlayacaktır. Camilerdeki güvenlik önlemlerinin toplumun genel refahını artırmaya yönelik birer adım olduğu unutulmamalıdır. Bu bağlamda, cami cemaatinin de İSG konusunda bilinçlendirilmesi ve toplumsal güvenliğin sağlanması gerektiği vurgulanmalıdır.

Sonuç olarak, camilerde iş sağlığı ve güvenliği uygulamalarındaki eksiklikler yalnızca çalışanların sağlığını değil, cemaatin güvenliğini de tehdit etmektedir. Bu eksikliklerin giderilmesi ve İSG kültürünün cami ortamında yerleşmesi, hem bireylerin güvenliğini sağlamak hem de camilerin toplumsal güvenlik alanı olarak itibarını artırmak için gereklidir. Camilerde İSG önlemleri almak, sadece lüks değil, bir zorunluluktur. Gelecekte daha güvenli, sağlıklı ve huzurlu cami ortamları yaratmak, bugünden başlayacak bilinçli adımlarla mümkündür.

KAYNAKÇA

Aksu, M. (2020). Yangın Güvenliği ve Camiilerde Alınması Gereken Önlemler. İstanbul: Güvenlik Araştırmaları Dergisi.

Balcı, E. (2022). Kimyasal Risklerin Yönetimi: Temizlik Malzemeleri Üzerine Bir İnceleme. Sağlık Bilimleri Dergisi, 16(3), 200-210.

Çalışkan, T. (2020). Camiilerde İş Sağlığı ve Güvenliği: Mevcut Durum ve Öneriler. Dini Araştırmalar Dergisi, 10(2), 90-102.

Çetin, G. (2022). Camiilerdeki Güvenlik Açıkları: Analiz ve Çözüm Önerileri. İstanbul: Kamu Güvenliği Araştırmaları.

Demir, R. (2021). Camiilerde Fiziksel Riskler ve Önlemleri. Fiziksel Sağlık Araştırmaları Dergisi, 5(4), 78-85.

Kara, P. (2019). İşitme Kaybı ve Yüksek Ses Seviyesi: Camiiiler Üzerine Bir Çalışma. Ses Sağlığı Dergisi, 11(2), 34-42.

Öztürk, S. (2021). Camiilerde Hijyen Standartları ve Sağlık Riski Yönetimi. Hijyen ve Sanitasyon Dergisi, 7(1), 55-65.

Şahin, H. (2018). Yüksekten Çalışma Güvenliği: Camii Uygulamaları Üzerine Bir Değerlendirme. İş Sağlığı ve Güvenliği Araştırmaları, 6(3), 101-112.

Ulaş, M. (2021). Psikososyal Riskler ve Çalışan Sağlığı: Camiilerdeki Uygulamalar. Psikoloji Dergisi, 9(2), 88-99.

Yıldırım, K. (2019). Ergonomi ve Camii Çalışanlarının Fiziksel Sağlığı. Ergonomi Araştırmaları Dergisi, 3(1), 21-30.



Spor Ayakkabı Üretiminde Malzeme Teknolojisi

Selma Özarslan [1] ***& Gülşah Germen Tutaş*** [2] ***& Hüseyin Şevik*** [3]

[1] Doç Dr., Hatay Mustafa Kemal Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü
[2] Öğr. Gör. Niğde Ömer Halis Üniversitesi, Endüstriyel Hammaddeler ve Yapı Malzemeleri Uygulama ve Araştırma Merkezi , Orcid:0000-0002-7705-7465
[3] Doç. Dr., Mersin Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, 0000-0002-2065-412X

1. Giriş

Spor ve eğlence artık günlük hayatımızın ayrılmaz bir parçası. Bunun nedeni, haftalık çalışma saatlerinin azalması, emeklilik yaşının düşmesi ve daha uzun yaşam beklentisi nedeniyle daha fazla boş zamana sahip olmamızdır, ancak bu aynı zamanda yaşam tarzımızdaki değişikliklerin de bir sonucudur. Fiziksel egzersiz, sadece kasları geliştirmekle kalmaz, aynı zamanda hareket dengesini, dayanıklılığı ve kilo kontrolünü sağlar. Başka bir deyişle, spor yapmak kişinin daha sağlıklı ve aktif olmasına neden olur.

Doğal malzemelerden yüksek mühendislik ürünü malzemelere doğru yaşanan evrim, sporcuların antrenman ve müsabaka yapma şekillerini büyük ölçüde değiştirmiştir. Yüksek mühendislik ürünü malzemeler hem sporcuların performansını artırmada hem de spor yaralanmalarından zarar gören dokuların doğal onarımını teşvik etmede önemli bir rol oynayabilmektedir.

Spor ekipmanlarının optimum tasarımı, performansı artırmak, ekipmanı mümkün olduğunca kullanıcı dostu hale getirmek ve yaralanmaları önlemek için anatomiden malzeme bilimine kadar bir dizi disiplinin uygulanmasını gerektirir. Spor ekipmanlarının tasarımında, malzemelerin mukavemet, süneklik, yoğunluk, yorulma direnci, tokluk, elastik modül ve maliyet gibi çeşitli özellikleri dikkate alınmalıdır. Mümkün olan en az ağırlık için mümkün olan en yüksek mukavemete sahip bir malzeme istiyorsak, en yüksek özgül mukavemete sahip düşük yoğunluklu malzemeleri seçmek gerekir (Caine et al., 2012; Haake, 2001; Marshall, 1995).

2. Spor Ekipmanlarının Tasarımında Kullanılan İleri Malzemeler

Bir malzeme küçük gerilmeler altında deforme olduğunda, deformasyon elastik olabilir. Bu durumda, gerilim kaldırıldığında, malzeme orijinal şekline geri dönecektir. Elastik deformasyonun tamamına yakını hemen kaybolacaktır. Bununla birlikte, zamana bağlı başlangıç şekle geri dönüş de olabilir. Bu zamana bağlı elastik davranışa elastisite veya visko-elastisite denir. Daha büyük gerilmeler plastik deformasyona neden olabilir. Bir malzeme plastik deformasyona uğradıktan sonra, stres kaldırıldığında orijinal şekline geri dönemez. Genellikle, deformasyona karşı yüksek direnç tercih edilir, böylece bir parça gerildiğinde kullanım esnasında şeklini koruyabilir (Hosford, 2010; Meyers et al., 2009).

Bununla birlikte, malzemelerin haddeleme, ekstrüzyon vb. yöntemlerle şekillendirilirken kolayca deforme olması istenir. Genellikle gerilme uygulanır uygu-

lanmaz plastik deformasyon meydana gelir. Ancak yüksek sıcaklıklarda, sürünme adı verilen zamana bağlı plastik deformasyon meydana gelebilir. Kırılma, bir malzemenin iki veya daha fazla parçaya ayrılmasıdır. Çok fazla plastik deformasyon oluşmadan önce kırılma meydana gelirse, malzemenin kırılgan olduğunu söyleriz. Bunun aksine, kırılmadan önce geniş çaplı plastik deformasyon meydana gelmişse, malzeme sünek olarak kabul edilir. Kırılma genellikle kritik bir gerilime ulaşılır ulaşılmaz meydana gelir; ancak, biraz daha düşük bir gerilimin tekrarlanan uygulamaları kırılmaya neden olabilir. Bir malzemenin maruz kaldığı deformasyon miktarı gerinim ile, bir cisme etki eden kuvvetler ise gerilme ile tanımlanır(Dowling et al., 2013; Meyers et al., 2009).

Spor ekipmanları yukarıda bahsedilen gereksinimleri karşılaması için genellikle metaller, seramikler ve polimerler malzeme sınıflarının tekil ya da birlikte kullanımından elde edilen kompozit malzemelerden üretilirler. Bu malzemeler, biyomekanik gereksinimlere gereken dikkat gösterilerek yaratıcı tasarımların göz önüne alındığı optimum malzeme seçimleri ile istenilen ekipmanlara dönüştürülür (J. Chen, 2010; Haake, 2001; Laad, 2020; Marshall, 1995; Subic, 2019).

Sporcunun performansını arttırmak için daha iyi spor ekipmanı yapmanın en önemli iki yolu vardır: Birincisi tasarımı yenilemek diğeri ise yeni malzeme geliştirmektir(Mike Jenkins, 2003; Subic, 2019) Özellikle, yeni malzemelerin geliştirilmesi veya mevcut malzemenin üretim teknolojinin geliştirilmesi ile özelliklerinin iyileştirilmesi spor ekipmanlarının geliştirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Örneğin atlama direkleri, hafif olmaları nedeniyle başlangıçta ahşap ve bambu gibi doğal malzemelerden yapılmaktaydı. Ancak direklerin uzunluğu sınırlıydı. 1960'larda cam elyaf kompozit direklerin geliştirilmesi mukavemet, sertlik ve yoğunluk gibi özelliklerde kayda değer bir iyileşme sağladı ve bu da yeni dünya rekorlarının oluşmasına neden oldu(J. Chen, 2010).

Metalik malzemeler demir ve demir-dışı metaller olarak iki alt sınıfta değerlendirilirler. Demir dışı metaller içinde hafif metaller olarak değerlendirilen nispeten düşük yoğunluğa sahip titanyum (4,5 g/cm^3), alüminyum (2,7 g/cm^3) ve magnezyum (1,7 g/cm^3) metali saf ya da çeşitli alaşımlar halinde spor ekipmanlarının üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır(Alkaya et al., 2022; Q. Chen & Thouas, 2015; Froes, 1999; International Magnesium Association, 2010; Keronite, 2002; Maleque, M.A.; Dyuti, 2010; Marshall, 1995; Pekguleryuz et al., 2013)

Metalik malzemelerin mukavemet/ağırlık (spesifik mukavemet) oranları birçok endüstride malzeme seçimi için önemli olduğu gibi spor endüstrisinde de ri-

jitlik, darbe-titreşim sönümleme, burma mukavemeti gibi birçok malzeme özelliğini için belirleyicidir(Dowling et al., 2013; International Magnesium Association, 2010; Mike Jenkins, 2003; Subic, 2019). Bazı metal ve alaşımların spesifik mukavemet değerleri Tablo 1'de verilmiştir(https://en.wikipedia.org/wiki/Specific_strength). Çünkü spor malzemesi dizaynı yapılırken yukarıda bahsedilen malzeme özelliklerinden ödün vermeden ağırlıktan muazzam kazanım gerçekleştirilebilir. Bu çalışmada bu nedenle hafif alaşımların çeşitli spor alanlarındaki uygulamaları hakkında bilgi verilecektir.

Tablo 1. Çeşitli metal ve alaşımların spesifik mukavemeti. (https://en.wikipedia.org/wiki/Specific_strength)

Malzeme	Çekme Mukavemeti (MPa)	Yoğunluk (g/cm^3)	Spesifik Mukavemet (kN.m/kg)
Bakır	220	8,92	24,7
Düşük karbonlu Çelik (AISI 1010)	365	7,87	46,4
Paslanmaz Çelik (304)	505	8,00	63,1
Titanyum	344	4,51	76
Alüminyum	55	2,7	20
Alüminyum Alaşımı (6061)	310	2,7	115
Alüminyum Alaşımı (7075)	572	2,81	204
Magnezyum Alaşımı (AZ63)	275	1,74	158

2.1. Yarış Bisikleti

Özellikle hızın önemli olduğu yarış bisikletlerinin ağırlığını azaltmaya yönelik ilgi, bisikletlerin ağırlığının yarış bisikletçilerinin performansını etkileyebileceği düşüncesinden kaynaklanmıştır. Örneğin, yapılan çalışmalar yarış bisikletinin ağırlığı bir gram azaltılırsa, saniyenin binde biri kadar zaman kazandıracağını göstermiştir. Sonuç olarak, ağırlık ne kadar az olursa performansın o kadar iyi olacağı aşikardır (Deetz, 2005; International Magnesium Association, 2010; M. Li et al., 2021; Maleque, M.A.; Dyuti, 2010; Mike Jenkins, 2003; Rontescu et al.,

2015). Bir bisikletin ana parçası "kadro" olarak isimlendirilen ana iskelet kısmıdır. Endüstriyel kadro üretimi için çelik, alüminyum, titanyum, magnezyum veya karbon bazlı kompozit malzemeler kullanılmaktadır. Özellikle yüksek mukavemet ve düşük maliyet özelliklerinden dolayı çelik geleneksel bisiklet kadro üretiminde ön sıradadır. Fakat daha önce de belirtildiği gibi performansı etkileyen ağırlık konusu alternatif malzemelerinde ortaya çıkmasına neden olmuştur (Ayachi et al., 2015; Mike Jenkins, 2003; Suthahar et al., 2023).

Alüminyum Alaşımları

Çoğu metal gibi alüminyumda saf halde arzu edilen mekanik özelliklere sahip olmadığı için alaşım elementi ilavesi, çeşitli üretim yöntemlerinin kullanımı ve ısıl işlemler gibi bir dizi değişimler ile kullanılmaktadır (El Garchani et al., 2023; Mehra et al., 2022; Sun et al., 2023; You et al., 2024). Alüminyum alaşımı 6061 ve 7000 serisi alaşımlar yaygın olarak bisiklet kadrolarının üretiminde kullanılmaktadır(J. Chen, 2010; Davis & Hull, 1981; Lin et al., 2017; Rontescu et al., 2015).

Bisiklet endüstrisinde yaygın olarak kullanılan alüminyum alaşımlarından bazıları şunlardır:

6013 Alüminyum Alaşımı: Havacılık ve uzay endüstrisinde kullanılan birkaç Al-Mg-Si-Cu alaşımından biridir. T6 ısıl işlemi ile 6013 alüminyum alaşımının çekme mukavemeti 6061-T6'dan %15 daha yüksektir. Ayrıca iyi şekillendirilebilme özelliğinden dolayı da makine imalatında yaygın olarak kullanılmaktadır. Son yıllarda gelişmiş performans özellikleri nedeniyle bisiklet endüstrisinde popülerlik kazanmıştır(Abdala et al., 2008; E-magazines & Circle, 2024; Lei et al., 2022; Oliveira et al., 2015).

6061 Alüminyum Alaşımı: Alüminyum, magnezyum ve silisyum metallerinin bir araya gelmesi ile oluşan 6061 alaşımı yüksek özgül mukavemet, düşük yoğunluk, iyi kaynak tutma kabiliyeti ve korozyon direnci avantajları ile mühendislik uygulamaları, havacılık ve uzay endüstrisi, bisiklet kadrolarının üretimini içeren spor ekipmanları ve makine imalatında kullanılmaktadır(E-magazines & Circle, 2024; Ma et al., 2023; Patil et al., 2023; Siddesh Kumar et al., 2022).

6069 Alüminyum Alaşımı: 6061'e benzer şekilde, bu alaşım alüminyum, magnezyum ve silisyum metalinden oluşur. Mukavemet, ağırlık ve şekillendirilebilirliğin iyi bir kombinasyonunu sunarak çeşitli sürüş stilleri için bisiklet kadro üretiminde tercih edilmektedir(E-magazines & Circle, 2024; Siddesh Kumar et al., 2022).

7005 Alüminyum Alaşımı: Esas olarak alüminyum, çinko ve magnezyum metalinden oluşan 7005 alaşımı, yüksek mukavemeti ve darbe direnci nedeniyle genellikle yüksek gerilmelere maruz kalınan uygulamalarda kullanılır. İyi yorulma direncine sahiptir ve genellikle hafif, performans odaklı bisiklet kadroları için kullanılır(BAKHSHI et al., 2021; E-magazines & Circle, 2024; Hou et al., 2023; Wang et al., 2014).

Titanyum Alaşımları

1960'larda, titanyum alaşımları ilk olarak Amerika Birleşik Devletleri'nde bisiklet kadrolarının yapımında kullanılmıştır(J. Chen, 2010). En yaygın kullanılan titanyum alaşımı, yaşlandırma işleminden sonra 1160 MPa değerlerine ulaşabilen düşük yoğunluk ve iyi mukavemete, iyi yorulma mukavemetine ve mükemmel korozyon direncine sahip olan Ti-6Al-4V'dir. Titanyum boru kullanan tekerlekli sandalyeler de engelli insanlar için piyasada bulunabilir. Ancak titanyum alaşımları, elde etmek için cevherden saf titanyum metali elde etmenin enerji maliyetleri çok yüksektir. Ayrıca, titanyum kaynağı esnasında, oksijene olan güçlü afinitesi nedeniyle inert bir atmosfer gerektirir. Bu nedenle, titanyum ürünlerinin maliyeti alüminyum alaşımları, magnezyum alaşımları ve çeliklerden önemli ölçüde daha yüksektir(C. X. Li et al., 2007; M. Li et al., 2021; Manonukul et al., 2014; Rahmatpour & Meymandi, 2020; Rontescu et al., 2015; Trojanová et al., 2022; Verleysen & Peirs, 2017).

Magnezyum Alaşımları

Magnezyum, demirden %78, titanyumdan %40 ve alüminyum metalinden %36 daha hafif olmasından dolayı modern teknoloji olan uzay, uçak, otomotiv parçalarının ve spor ekipmanlarının üretiminde önemli bir metalik malzemedir. Tüm yapı malzemeleri arasında en yüksek mukavemet/ağırlık oranına sahip metaldir. Fakat saf magnezyum reaktiftir ve alaşımları çeşitli sulu veya nemli koşullar altında korozyona dayanıklı değildir. Bu nedenle çeşitli alaşım elementleri ile korozyon direnci kabul edilebilir alaşımlar geliştirilmiş ve geliştirilmeye devam etmektedir. (Chalisgaonkar, 2019; Deetz, 2005; Dong, 2016; International Magnesium Association, 2010; Pekguleryuz et al., 2013). Genel olarak, alüminyum, çinko, manganez, itriyum gibi metaller farklı ağırlık oranlarında eklenerek korozyon direnci büyük ölçüde artırılabilir. Aynı zamanda, mukavemeti ve mekanik özellikleri de geliştirilebilir. Yukarıda açıklandığı gibi, kadro bir bisikletin en büyük parçasıdır. Hafif malzemeler, bisikletlerin ağırlığını azaltan çerçeveler üretmek için başarıyla kullanılmaktadır. Aynı zamanda, dişliler, direksiyon çubukları, sele direkleri, tekerlekler, zincirler, rulmanlar ve kranklar gibi hafif mal-

zemelerden yapılmış başka parçalar da vardır. Hafif alaşımların başarılı bir şekilde spor ekipmanı üretiminde kullanılabiliyor olması bisikletin bir spor olarak gelişmesini sağlamıştır(Atrens et al., 2015; Guang et al., 2000; Kainer, 2003).

2.2. Golf

Golf topunu mümkün olduğunca az vuruşla deliğe sokmak gibi görünürdeki "kolay" hedefe rağmen, bu hedefi gerçekleştirmek üzere golf sopalarını geliştirmek için pek çok çalışma yapılmıştır. Golf sopalarının, koşullara bağlı olarak, topu başlama noktasından mümkün olduğunca uzağa sürmekten çim alanda çok daha kontrollü atışlara kadar birçok farklı işlevi yerine getirebilmesi beklenir(J. Chen, 2010).

Ticari olarak saf titanyum golf sopaları için yeterli mukavemete sahip değildir. Ayrıca oyun esnasında topa ilk temas golf sopasının kafasında gerçekleşir ve topun enerjisi golf sopasının başlığından iletilir. Sonuç olarak golf sopasının başlığının mukavemeti, esnekliği ve sürtünme katsayısı gibi etkenler topun hızını ve dönüşünü önemli ölçüde etkileyebilir. Bu nedenle golf ekipmanları özellikle de golf sopalarının tasarımında çeşitli alaşımlar kullanılır. Ti-6Al-4V alaşımı en yaygın kullanılanı olmak ile birlikte Ti-3Al-2.5V ve beta alaşımı Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al dahil kullanılan birkaç alaşım mevcuttur(J. Chen, 2010; Chester Shira, 2010; Froes, 1999; Miller et al., 2015).

Ti-6Al-4V için, sopa yüzündeki darbe kuvvetinin ulaştığı değerler nedeniyle sürücüler ve golf sopası başı (fairway woods) için 3,8 mm'lik bir kalınlık gereklidir. Sopa tasarımcıları daha da inceltmek isteseler de kullanım sırasında plastik deformasyon riskini en aza indirmek için akma gerilmesinin (σ_y) yüksek olması gerekir. Elastik deformasyon enerjisini maksimize etmek için elastik modül (E) düşük olmalıdır. Bu nedenle, malzeme açısından bakıldığında, sopa kafası için kullanılan malzemelerin σ_y/E oranı önem arz etmektedir. Ti alaşımları en yüksek σ_y /E'ye sahiptir, bunu çelikler ve son olarak çökelme sertleştirmesi ile sertleştirilebilen alüminyum bazlı alaşımlar takip eder(Davies et al., 2002; Mike Jenkins, 2003; Miller et al., 2015).

2.3. Tenis

Geleneksel olarak raketler yakın zamana kadar dişbudak, akçaağaç ve okume ağacı gibi genel ismi ahşap olan malzemeden yapılmaktaydı(J. Chen, 2010; Marshall, 1995).

Modern raket tasarımlarının arkasındaki felsefe, dinamik özellikleri iyileştirmek, top kontrolünü kolaylaştırmak ve vuruşun kendisi tarafından oluşturulan tehlikeli titreşimleri azaltmaktır. Genellikle topun raketin 'ortasında bir yere', yani

'tatlı noktaya' vurulduğu varsayılır. Tatlı nokta şu şekilde tanımlanır(Marshall, 1995):

- Tellerin, oyuncunun darbeyi takiben hiçbir şok hissetmediği kısmı;

-Topa vurulduğunda tellerin minimum titreşime sahip olan kısmı (bu aynı zamanda titreşim mekaniğinde 'düğüm noktası' olarak da adlandırılır.)

Özellikle metallerin yorulma direnci, darbe sönümleme, şekil verilebilirlik özellikleri gibi mekaniksel özelliklerin iyileştirilmesi ile tenis raket üretiminden metalik malzemeler kullanılmaya başladı(J. Chen, 2010; Gupta & Sharon, 2010; M. Li et al., 2021; Marshall, 1995; Nowell & Wright, 2001; Subic, 2019). Güncel pazarda, özellikle de yüksek kalitelinin istendiği pazara kompozit raketler hakim olsa da, alüminyum 6061 hala pazarda önemli bir yer tutan düşük maliyetli raketler için kullanılmaktadır(Mike Jenkins, 2003).

Son yıllarda, Japonya'da titanyum tenis raketlerine olan talep de artmaktadır. Japonya'daki hemen hemen her tenis raketi üreticisi, raket pazarının yaklaşık yarısını oluşturan titanyum raketler satıyor. Üreticiler, titanyumun yeni kullanım alanlarını genişletmek amacıyla, titanyum-nikel süper elastik alaşımlar(şekil hafızalı) geliştirmiştir(M. Li et al., 2021).

Kaynaklar

Abdala, M. R. W. S., Garcia de Blas, J. C., Barbosa, C., & Acselrad, O. (2008). Thermoelectrical power analysis of precipitation in 6013 aluminum alloy. *Materials Characterization*, *59*(3), 271–277. https://doi.org/10.1016/j.matchar.2007.01.005

Alkaya, G. B., Demirci, Ç., & Şevik, H. (2022). Aluminum in food and potential role on Alzheimer's disease of aluminum. *Turkish Journal of Engineering*, *6*(2), 118–127. https://doi.org/10.31127/tuje.846455

Atrens, A., Song, G. L., Liu, M., Shi, Z., Cao, F., & Dargusch, M. S. (2015). Review of recent developments in the field of magnesium corrosion. *Advanced Engineering Materials*, *17*(4), 400–453. https://doi.org/10.1002/adem.201400434

Ayachi, F. S., Dorey, J., & Guastavino, C. (2015). Identifying factors of bicycle comfort: An online survey withenthusiast cyclists. *Applied Ergonomics*, *46*(Part A), 124–136. https://doi.org/10.1016/j.apergo.2014.07.010

BAKHSHI, R., FARSHIDI, M. H., & SAJJADI, S. A. (2021). Strengthening of aluminium alloy 7005 through imposition of severe plastic deformation supplemented by different ageing treatments. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*, *31*(10), 2909–2921. https://doi.org/10.1016/S1003-6326(21)65702-3

Caine, M., Blair, K., & Vasquez, M. (2012). Materials and technology in sport. *Nature Materials*, *11*(8), 655–658. https://doi.org/10.1038/nmat3382

Chalisgaonkar, R. (2019). Insight in applications, manufacturing and corrosion behaviour of magnesium and its alloys - A review. *Materials Today: Proceedings*, *26*, 1060–1071. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.211

Chen, J. (2010). Surface engineered light alloys for sports equipment. *Surface Engineering of Light Alloys: Aluminium, Magnesium and Titanium Alloys*, 549–567. https://doi.org/10.1533/9781845699451.3.549

Chen, Q., & Thouas, G. A. (2015). Metallic implant biomaterials. *Materials Science and Engineering R: Reports*, *87*, 1–57. https://doi.org/10.1016/j.mser.2014.10.001

Chester Shira, H. F. (2010). Advanced Materials in Golf Clubs:The Titanium Phenomenon. *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, *130*(2), 556. http://dx.doi.org/10.1016/j.jaci.2012.05.050

Davies, R. W., Khaleel, M. A., Kinsel, W. C., & Zbib, H. M. (2002). Anisotropic yield locus evolution during cold pilgering of titanium Alloy Tubing. *Journal of Engineering Materials and Technology*, *124*(2), 125–134. https://doi.org/10.1115/1.1446472

Davis, R., & Hull, M. L. (1981). Design of aluminum bicycle frames. *Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME*, *103*(4), 901–907. https://doi.org/10.1115/1.3255004

Deetz, J. (2005). The use of wrought magnesium in bicycles. *Jom*, *57*(5), 50–53. https://doi.org/10.1007/s11837-005-0096-z

Dong, S. (2016). Study on modification of novel magnesium alloy for sports equipment. *Chemical Engineering Transactions*, *51*, 241–246. https://doi.org/10.3303/CET1651041

Dowling, N. E., Prasad, K. S., & Narayanasamy, R. (2013). *Mechanical Behavior of Materials Engineering Methods for Deformation, Fracture, and Fatigue* (Issue 112). Pearson Education Limited.

E-magazines, R., & Circle, A. L. (2024). *BUY REPORTS The alloy of choice : Aluminium ' s dominance in the bicycle industry*. 9–12.

El Garchani, F. E., Lgaz, H., Kaya, S., Lee, H. S., Ibrahim, S. M., Chafiq, M., Ko, Y. G., & Kabiri, M. R. (2023). Effects of heat treatment on the corrosion behavior and mechanical properties of aluminum alloy 2024. *Journal of Materials Research and Technology*, *25*, 1355–1363. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.05.278

Froes, F. H. (1999). Will the titanium golf club be tomorrow's Mashy Niblick? *Jom*, *51*(6), 18–20. https://doi.org/10.1007/s11837-999-0087-6

Guang, B., Song, L., & Atrens, A. (2000). *Corrosion Mechanisms of Magnesium Alloys* **. *1*, 11–33.

Gupta, M., & Sharon, N. M. L. (2010). Magnesium, Magnesium Alloys, and Magnesium Composites. In *Magnesium, Magnesium Alloys, and Magnesium Composites*. https://doi.org/10.1002/9780470905098

Haake, F. H. (Sam) F. andS. J. (2001). Science in Sports. *Scientific American*, *13*(24), 1–10. https://doi.org/10.1038/scientificamerican02201858-192

Hosford, W. F. (2010). *MECHANICAL BEHAVIOR OF MATERIALS*. Cambridge University Press.

Hou, J., Deng, P., Wang, S., Xu, H., & Shi, Y. (2023). Study on formability and microstructure evolution of hot deep drawing manufactured 7005 aluminum alloy sheet metal. *Materials Today Communications*, *36*(May), 106794. https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.106794

International Magnesium Association. (2010). Magnesium Liftgate Improves Fuel Economy. *Magneisum Showcase*, *12*, 1–4.

Kainer, K. U. (2003). *Magnesium – Alloys and Technology Edited by*.

Keronite. (2002). Coating technology enables production of super lightweight magnesium frames. *Anti-Corrosion Methods and Materials*, *49*(6). https://doi.org/10.1108/acmm.2002.12849faf.001

Laad, M. S. (2020). *Chapter 15 - Polymers in sports* (M. A. A. AlMaadeed, D. Ponnamma, & M. A. B. T.-P. S. and I. A. Carignano (eds.); pp. 485–523). Elsevier. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816808-0.00015-9

Lei, G., Wang, B., Lu, J., Wang, C., Li, Y., & Luo, F. (2022). Effects of solid solution temperature on the microstructure and properties of 6013 aluminum alloy. *Materials Chemistry and Physics*, *280*(July 2021), 125829. https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2022.125829

Li, C. X., Horspool, D., & Dong, H. (2007). Effect of ceramic conversion surface treatment on fatigue properties of Ti6Al4V alloy. *International Journal of Fatigue*, *29*(12), 2273–2280. https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2006.11.016

Li, M., Pan, Y., & Zou, Y. (2021). Application and Optimization Design of Titanium Alloy in Sports Equipment. *Journal of Physics: Conference Series*, *1820*(1). https://doi.org/10.1088/1742-6596/1820/1/012011

Lin, C. C., Huang, S. J., & Liu, C. C. (2017). Structural analysis and optimization of bicycle frame designs. *Advances in Mechanical Engineering*, *9*(12), 1–10. https://doi.org/10.1177/1687814017739513

Ma, H., Lu, K., & Liu, X. (2023). Experimental and numerical studies on lateral low-velocity impact behaviour and residual axial strength of circular aluminum alloy (6061-T6) tubes. *Structures*, *47*(November 2022), 1250–1264. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.11.017

Maleque, M.A.; Dyuti, S. (2010). Materials for Bicycle Frame System – A Case Study on the Development of Selection Method. *The Third International Conference on Structure, Processing and Properties of Materials SPPM2010*, *February*. https://www.researchgate.net/publication/260789550_Materials_for_Bicycle_Frame_System_-_A_Case_Study_on_the_Development_of_Selection_Method

Manonukul, A., Tange, M., Srikudvien, P., Denmud, N., & Wattanapornphan, P. (2014). Rheological properties of commercially pure titanium slurry for metallic foam production using replica impregnation method. *Powder Technology*, *266*, 129–134. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2014.06.030

Marshall, I. H. (1995). Advanced materials for sports equipment. In *Composite Structures* (Vol. 33, Issue 2). https://doi.org/10.1016/0263-8223(95)00086-0

Mehra, A., Singh, R., Chauhan, A. S., Nath, K., & Yadav, A. (2022). Design and analysis of an electric bike chassis. *Materials Today: Proceedings*, *62*, 1510–1520. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.247

Meyers, M., Engineering, A., Diego, S., Conferences, E., Senior, H., Award, S., Scientist, T. M. S. D., Awards, E., Award, L. H., Chawla, K., & Science, M. (2009). Mechanical behavior of materials. In *Choice Reviews Online* (Vol. 46, Issue 12). https://doi.org/10.5860/choice.46-6830

Mike Jenkins. (2003). Materials in sports equipment. In *Materials in Sports Equipment*. Woodhead Publishing Limited. https://doi.org/10.1016/C2017-0-02237-1

Miller, M., Chavez, T., Dearborn, M., Tong, E., Devore, E., Marloth, R., Li, Y. J., Zeng, L., Ramsey, B., Mulazimoglu, H., Guerra, J., Foyos, J., Ula, N., Garmestani, H., & Es-Said, O. S. (2015). Effect of Heat Treatments on the Mechanical Properties of Ti-3Al-2.5V Alloy. *Journal of Materials Engineering and Performance*, *24*(9), 3277–3290. https://doi.org/10.1007/s11665-015-1628-5

Nowell, M. M., & Wright, S. I. (2001). *Materials and Science in Sports*. *7514*(724), 3.

Oliveira, A. C., Siqueira, R. H. M., Riva, R., & Lima, M. S. F. (2015). One-sided laser beam welding of autogenous T-joints for 6013-T4 aluminium alloy. *Materials and Design*, *65*, 726–736. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.09.055

Patil, S., Nagamadhu, M., & Malyadri, T. (2023). A critical review on microstructure and hardness of aluminum alloy 6061 joints obtained by friction stir welding-past, present, and its prospects. *Materials Today: Proceedings*, *82*, 75–78. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.11.362

Pekguleryuz, M., Kainer, K., & Kaya, A. A. (2013). Fundamentals of magnesium alloy metallurgy. In *Fundamentals of Magnesium Alloy Metallurgy*. https://doi.org/10.1533/9780857097293

Rahmatpour, A., & Meymandi, M. G. (2020). Techno-economic evaluation of titanium catalyst production cycle from ilmenite purer (a case study at Kahnooj mine in Iran). *Chemical Engineering Science*, *216*, 115489. https://doi.org/10.1016/j.ces.2020.115489

Rontescu, C., Cicic, T. D., Amza, C. G., Chivu, O., & Dobrotă, D. (2015). Choosing the optimum material for making a bicycle frame. *Metalurgija*, *54*(4), 679–682.

Siddesh Kumar, N. M., Dhruthi, Pramod, G. K., Samrat, P., & Sadashiva, M. (2022). A Critical Review on Heat Treatment of Aluminium Alloys. *Materials Today: Proceedings*, *58*, 71–79. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.586

Subic, A. (2019). *Materials in Sports Equipment*. Woodhead Publishing Limited.

Sun, Z., Ma, Y., Ma, S., Xiong, H., & Chen, B. (2023). Mechanical properties and corrosion resistance enhancement of 2024 aluminum alloy for drill pipe after heat treatment and Sr modification. *Materials Today Communications*, *36*(938), 106805. https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.106805

Suthahar, P., Arunkumar, R., Rajeshwaran, M., Asaithambi, T., & Parthasarathy, S. (2023). Design and analysis of bicycle frame by using metal matrix

composites. *Materials Today: Proceedings*, *xxxx*. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.05.355

Trojanová, Z., Halmešová, K., Drozd, Z., Džugan, J., Valiev, R. Z., & Podaný, P. (2022). The influence of severe plastic deformation on the thermal expansion of additively manufactured Ti6Al4V alloy. *Journal of Materials Research and Technology*, *19*, 3498–3506. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.06.097

Verleysen, P., & Peirs, J. (2017). Quasi-static and high strain rate fracture behaviour of Ti6Al4V. *International Journal of Impact Engineering*, *108*, 370–388. https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2017.03.001

Wang, M. L., Jin, P. P., Wang, J. H., & Han, L. (2014). Hot deformation behavior of as-quenched 7005 aluminum alloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*, *24*(9), 2796–2804. https://doi.org/10.1016/S1003-6326(14)63411-7

You, X., Xing, Z., Jiang, S., Zhu, Y., Lin, Y., Qiu, H., Nie, R., Yang, J., Hui, D., Chen, W., & Chen, Y. (2024). A review of research on aluminum alloy materials in structural engineering. *Developments in the Built Environment*, *17*(January), 100319. https://doi.org/10.1016/j.dibe.2023.100319



Metasezgisel Optimizasyon Algoritmalarının Cec2019 Ölçütlerine Göre Performans Analizi

***Rabia Uyar*[1]**

[1] Arş. Gör., Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Bilgisayar Mühendisliği, ORCID: 0000-0002-6565-0560

GİRİŞ

Günümüzde klasik optimizasyon yöntemleri, genellikle belirli varsayımlar ve kısıtlar altında çalıştıkları için karmaşık ve dinamik problemlerin çözümünde yetersiz kalabilmektedir. Bu sınırlamalar, araştırmacıları daha esnek, uyarlanabilir ve geniş kapsamlı çözüm sunabilen metasezgisel optimizasyon yöntemlerine yönlendirmiştir (Alatas, 2019; Sadollah vd., 2015). Metasezgisel yöntemler, doğadaki biyolojik, fiziksel ve toplumsal süreçlerden ilham alarak geliştirilmiş, stokastik bir yapıya sahip, esnek ve genelleştirilmiş algoritmalardır. Bu algoritmalar, çözüm arama sürecinde rastgelelik ilkesini kullanarak, problem uzayının geniş bir bölümünü keşfetme ve çözüm arama yeteneğine sahiptir. Bu özellikleri, metasezgisel yöntemleri, geleneksel optimizasyon tekniklerine göre daha güçlü ve yaygın bir alternatif haline getirmiştir (Altay, 2022).

Metasezgisel optimizasyon algoritmalarının temel esin kaynakları, doğadaki biyolojik sistemlerden fiziksel süreçlere, toplumsal davranışlardan matematiksel modellere kadar uzanan geniş bir yelpazeye sahiptir (Nadimi-Shahraki vd., 2021; Sadollah vd., 2015). Bu çeşitli ilham kaynakları, araştırmacıların optimizasyon süreçlerinde daha etkili yöntemler geliştirmelerine olanak tanımıştır.

Metasezgisel optimizasyon algoritmaları, keşif (exploration) ve sömürü (exploitation) olmak üzere iki temel aşamadan oluşmaktadır (Zhou vd., 2017). Keşif aşaması, arama uzayındaki farklı bölgeleri tarayarak, çözüm uzayının daha geniş bir bölümünü kapsamayı amaçlar. Bu aşama, algoritmanın küresel optimal çözümlere ulaşması için hayati öneme sahiptir. Sömürü aşamasında ise, keşif aşamasında bulunan potansiyel bölgeler daha ayrıntılı bir şekilde taranır ve bu bölgelerdeki yerel optimuma yakın çözümler iyileştirilir. Ancak, bu iki aşama arasında bir denge kurmak zordur ve dengenin sağlanamaması, erken yakınsama ya da çözüm uzayının tamamının keşfedilememesi gibi sorunlara neden olabilmektedir (Mirjalili & Lewis, 2016). Bu nedenle, metasezgisel algoritmaların performansını artırmak için bu dengeyi sağlayacak stratejiler geliştirilmiştir. Metasezgisel algoritmaların başarısı, keşif ve sömürü aşamaları arasındaki dengeyi nasıl sağladıklarına bağlıdır. Bu denge, keşif aşamasında çözüm uzayının yeterince geniş bir şekilde taranmasını, sömürü aşamasında ise optimal çözüme doğru kademeli bir iyileşme sürecini ifade etmektedir. Keşif sürecinde aşırıya kaçılması, gereksiz hesaplama maliyetine neden olurken, sömürü sürecinin yetersiz olması, optimal çözümün bulunmasını engelleyebilmektedir (Mirjalili & Lewis, 2016). Bu sebeple araştırmacılar, bu dengenin sağlanmasına yönelik uyarlanabilir parametreler ve hibrit metotlar geliştirmiştir. Bu çabalar, metasezgisel algoritmaların çözüm kalitesini artırmıştır (Mohamed vd., 2020).

Her optimizasyon problemine tek bir algoritmanın kesin çözüm sunması mümkün değildir. Bu durum, "No Free Lunch" teoremiyle de desteklenmektedir (Kaveh & Bakhshpoori, 2016). Bu nedenle, her optimizasyon problemine özel yeni metasezgisel algoritmalar geliştirilmesi bir gereklilik oluşturmaktadır. Örneğin, kuantum hesaplama ilkelerini kullanan kuantum tabanlı algoritmalar ve derin öğrenme ilkelerini entegre eden akıllı metasezgisel algoritmalar, bu alandaki yenilikçi yaklaşımlar arasında yer almaktadır (Faramarzi vd., 2020; Heidari vd., 2019). Bu süreç, metasezgisel algoritmaların gelişimini hızlandırarak daha etkili çözümler sunulmasına olanak tanımıştır.

Metasezgisel algoritmaların performansını değerlendirmek için kullanılan yaygın bir test ölçütü, CEC (IEEE Congress on Evolutionary Computation) fonksiyon setleridir. Bu setler, optimizasyon problemlerini değerlendirmek için kullanılan standart bir karşılaştırma çerçevesi sunmaktadır (Alatas, 2019; Altay & Varol Altay, 2023). Bu çalışmada da CEC fonksiyon setlerinden CEC 2019 ölçüt seti kullanılarak güncel metasezgisel algoritmaların başarımları değerlendirilmiştir.

MATERYAL VE METHOD

Fındıkkıran Optimizasyon Algoritması (NOA)

NOA, Kırca kuşlarının çeşitli davranışları taklit etmek, farklı yerel ve global arama operatörlerine sahip olarak çeşitli optimizasyon problemlerini daha iyi sonuçlarla çözebilmek için önerilmiş bir algoritmadır (Abdel-Basset vd., 2023). Algoritmanın üç ana aşaması bulunmaktadır:

- **Foraj Aşaması (Keşif Aşaması 1):** Fındık kırıcıları, başlangıç pozisyonlarını belirleyip tohumları araştırarak hareket ederler. İyi tohumlar bulunduğunda depolama alanına taşınır. Keşif aşamasının denklemi şu şekilde ifade edilmektedir (Alatas,2019).

$$\vec{X}_i^{t+1(new)} = \begin{cases} \overrightarrow{X_i^t} + \mu.\left(\overrightarrow{X_{best}^t} - \overrightarrow{X_i^t}\right).|\lambda| + r_1.\left(\overrightarrow{X_A^t} - \overrightarrow{X_B^t}\right) & if\ \tau_1 < \tau_2 \\ \overrightarrow{X_{best}^t + \mu.(X_A^t - X_B^t)} & if\ \tau_1 < \tau_3 \\ \overrightarrow{X_{best}^t}.\, l & diğer\ durumda \end{cases} \quad (1)$$

Bu denklem, foraj aşamasında fındık kırıcılarının konumlarını güncellemek için kullanılır. Farklı durumlar altında konumları güncelleme stratejisini içerir.

- **Depolama Aşaması (Sömürü Aşaması 1):** Fındık kırıcıları, buldukları tohumları geçici depolama alanına taşırlar. Bu aşamada, önbellek

arama ve depolama işlemleri gerçekleşir. Arama ve depolama işlemleri, rastgele konum güncelleme stratejileri ile yönlendirilir.

$$\overrightarrow{X_i^{t+1}} = \begin{cases} \overrightarrow{X_i^t}, & if\ f\left(\overrightarrow{X_i^t}\right) < if\ (\overrightarrow{RP_{i,1}^t}) \\ \overrightarrow{RP_{i,1}^t}, & diğer\ durumda \end{cases} \quad (2)$$

Bu denklem, sömürü aşaması 1'de fındık kırıcılarının geçici depolama alanına tohum taşımak için konumlarını güncellemek için kullanılır.

- **Önbellek Arama Aşaması (Keşif Aşaması 2):** Kışın gelmesiyle birlikte, fındık kırıcıları önbelleklerini bulmaya çalışırlar. Bu aşamada, fındık kırıcıları, önbelleklerini hatırlamak için referans noktalarını kullanırlar ve başarısız olurlarsa diğer referans noktalarını kullanarak aramaya devam ederler.

$$\overrightarrow{X_{i.j}^{t+1}} = \begin{cases} X_{i.j}^t, & if\ \tau_3 < \tau_4 \\ X_{i.j}^t + r_1.(X_{best,j}^t - X_{i.j}^t) + r_2.(RP_{i,1}^t - X_{C.j}^t), & diğer\ durumda \end{cases} \quad (3)$$

Bu denklem, önbellek arama aşaması 2'de fındık kırıcılarının önbelleklerini bulma veya hatırlama sürecinde konumlarını güncellemek için kullanılır.

Cüce Mangusta Optimizasyon Algoritması (DMO)

DMO, Afrika'da yaşayan cüce mangustaların sosyal ve beslenme davranışlarından ilham alınarak geliştirilmiş bir meta-sezgisel optimizasyon algoritmasıdır. Bu algoritma, doğal yaşamdan esinlenerek, karmaşık optimizasyon problemlerini çözmek için kullanılır. *DMO* optimizasyon süreci için, üç farklı sosyal grup oluşturulup modellenmiştir (Agushaka vd., 2022). Bu gruplar aşağıda sunulmuştur.

- **Alfa grup:** Optimizasyon, alfa grubunun (uzayda keşfe çıkan) avlanmasıyla başlar ve bebek bakıcıları ile yavrularını yuvada bırakır.

- **Bebek bakıcısı:** Bir avlanma alanı bulunduğunda, alfa grubu, bebek bakıcısı değişim kriterleri tarafından simüle edilen öğle vaktine kadar beslenir ve sonra bebek bakıcılarını değiştirmek üzere geri dönerler. Bebek bakıcıları değiştirildiğinde, daha önce avlanmış bir bölgeye geri dönmezler ve aşırı otlatmayı önlerler.

- **Keşif grubu:** Keşifçiler yeni bir avlanma alanını belirlerler ve alfa dişisine bilgi vererek aileyi yeni alana yönlendirir. Bebek bakıcı değişimi ise yeni bir keşif aşamasını başlatır.

Popülasyon başlatıldığında, her çözümün uygunluğu hesaplanır. Her popülasyon uygunluğu için olasılık değeri aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır ve alfa dişisi (α) bu olasılığa dayanarak seçilir.

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^{n} f_i.t_i}{\sum_{i=1}^{n} f_i.t_i} \quad (4)$$

Alfa grubundaki mangustaların sayısı, n-b_s'ye karşılık gelir. Burada b_s, bebek bakıcısı sayısıdır. Alfa dişisinin aileyi bir yol boyunca tutan vokalizasyonu "cip" ile belirtilir. Başlangıçtaki uyku tepeciği ϕ olarak ayarlanır ve her mangusta içinde uyur. Aday bir yiyecek pozisyonu üretmek için DMO, aşağıdaki eşitliği kullanır.

$$X_{i+1} = X_i + \phi.cip \quad (5)$$

Burada phi, [-1,1] aralığında uniform dağılımlı rastgele bir sayıdır. Her iterasyon sonrasında, uyku tepeciği aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır.

$$sm_i = \frac{f_{i+1} - f_i}{max\{|f_{i+1}|,|f_i|\}} \quad (6)$$

Uyku tepeciğinin bulunduğu ortalama değeri aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır.

$$\phi = \frac{\sum_{i=1}^{n} sm_i}{n} \quad (7)$$

Algoritma, keşif aşamasına geçer ve bebek bakıcısı değişim kriteri sağlandığında bir sonraki yiyecek kaynağı veya uyku tepeciği değerlendirilir. Keşifçiler, cüce mangustalarının önceki uyku tepeciğine geri dönmediği bilindiğinden, keşfe garanti sağlayan yeni bir uyku tepeciği ararlar. Keşif aşamasıda modelde avlanma ile eş zamanlı gerçekleştirilir. Bu hareket, yeni bir uyku tepeciğini bulma başarısını veya başarısızlığını genel bir değerlendirme olarak algoritma modellenmiştir. Olması beklenen durum ise, aile yeterince uzak bir yerde avlanırsa yeni bir uyku tepeciği keşfetmeleridir.

$$X_{i+1} = \begin{cases} X_i - CF.\phi.rand.[X_i\overrightarrow{M}] & \phi_{i+1} > \phi_i \\ X_i + CF.\phi.rand.[X_i\overrightarrow{M}] & diğer\ durumda \end{cases} \quad (8)$$

Burada CF değeri, bir ölçekleme faktörüdür. P_{hi} değeri, [-1,1] aralığında uniform dağılımlı rastgele bir sayıdır. $\vec{M}$ ise, bir uyku tepeciği değerini bulma yönünü temsil eder.

Optik Mikroskop Algoritması (OMA)

OMA, bir gözlemcinin nesnelere yaklaşma sürecini simüle eden fizik temelli bir algoritmadır (Cheng & Sholeh, 2023). Bu süreç, gözlemcinin gözünden başlayarak mikroskop lensleri aracılığıyla ilerler. OMA'nın en iyi hedef nesneyi elde etmek için kullandığı dört adımlı süreç aşağıda sunulmuştur.

- **Çıplak göz:** Gözlem, nesneyi numune sahnesine uygun bir şekilde monte etmekle başlar. Ardından gözlemci, nesnenin boyutu, şekli ve özellikleri hakkında bilgi edinmek için çıplak göz gözlemleri yapar.
- **Objektif lens:** İlk hedef nesnelerin gözlemi, objektif lens kullanılarak devam eder. Bu adımda görüntü büyütmesini belirleyen faktör, bu özel objektif optik elemanın özelliklerine göre belirlenen sabit bir değişkendir.
- **Oküler:** Oküler, objektif lensi daha da büyütür ve bu adımda kullanılan okülerin büyütme gücü (MP) tarafından belirlenir. Bir mikroskobun toplam büyütmesi, objektif lensin ve okülerin büyütme değerlerinin çarpımıyla hesaplanır.
- **En iyi hedef nesne:** Her büyütme döngüsünün sonuçları karşılaştırılarak hedef nesnenin büyütme değeri elde edilir.

OMA'nın iki aşaması objektif lens ve okülerdir. Bu algoritma, "büyütme" terimini büyütülecek hedef nesne olarak kabul eder. Büyütme sürecinde büyütülecek potansiyel hedef nesnesi Mi olarak gösterilir ve çözüm olarak adlandırılır; x= 1, 2, ..., N_P olmak üzere N_P toplam potansiyel hedef nesne sayısıdır (popülasyon büyüklüğü). Optimizasyon süreci içinde OMA tarafından elde edilen en iyi sonuç "en iyi hedef nesne" (M_{best}) olarak adlandırılır. OMA optimizasyon algoritmasının aşamaları;

Bu algoritmanın hedef nesnenin büyütme prensibi, bileşik mikroskoplar tarafından kullanılan toplam görsel büyütme prensibini örnek alır ve objektif lens büyütme değeri aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır.

$$M_{total} = M_O \times M_E \quad (9)$$

Burada, M_{total} mikroskobun toplam görsel büyütmesini temsil eder, M_O objektif lensin büyütme değerini ve M_E okülerin büyütme değerini temsil eder.

Objektif lens tarafından gerçekleştirilen büyütme değeri aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır.

$$M_O = \frac{L}{f_O} \quad (10)$$

Burada L, mikroskop tüp uzunluğunu, f_O ise, objektif lensin odak uzunluğunu temsil eder. Her iki değeri hesaplamak içinde, objektif lensle büyütülmüş en iyi

hedef nesnesinin (M_{best}) konumu ile ilgili bir referansa ihtiyaç vardır. Objektif lensin büyütme gücü, 1.40 sayısal açıklığa (NA) sahip 100x'tir. Bu aşamanın modifiye edilmiş hedef nesnesi (M_{inew}) denklemi ise şu şekildedir;

$$M_{inew} = M_i + M_{PO} \times M_{best} \quad (11)$$

Burada M_i, ilk hedef nesneyi, M_{PO}, objektif lensin büyütme gücünü, M_{best} ise, en iyi hedef nesneyi temsil eder. M_{PO} değeri, lens tarafından nesnenin büyütme aralığını hesaplamak için kullanılır ve bu aralık 2.5x (NA = 0.08) büyütme gücünden başlayarak 100x (NA = 1.40) büyütme gücüne kadar değişir. Başlangıç büyütme ölçeği (mr), rastgele büyütme değerlerini temsil eden başlangıç büyütmesi için kullanılır.

$$M_{inew} = M_i + m_r \times 1.40 \times M_{best} \quad (12)$$

Daha sonra modifiye edilmiş hedef nesne (M_{inew}), mevcut nesne ile karşılaştırılır ve ikisinden daha iyi olan, en iyi büyütmeyi (M_{best}) seçilir. Mikroskobun ikinci merceği, objektif lensinden sonra nesneyi büyütmek için kullanılan okülerdir. Okülerin büyütme denklemi ise;

$$M_O = \frac{D}{fe} \quad (13)$$

D, görüşün en küçük mesafesini, *fe* ise, okülerin odak uzunluğunu temsil eder. Oküler aşaması, gelişmiş büyütmenin daha spesifik bir aşamasıdır. Bu nedenle, her ikisinin uzunluğunu belirlemek için bir referansa ihtiyaç vardır, ki bu da bir okülerle büyütülen yerel arama uzayının mesafesinden gelir. Okülerin büyütme etkisini simüle etmek için, büyütme uzayı, seçilen hedef nesne (i) ile popülasyondaki diğer hedef nesnesi (j) arasındaki mesafeye dayanarak belirlenir. Hedef nesne (j), yerel arama uzayını hesaplamak için rastgele seçilir.

M_{PE}, okülerin büyütme gücünü temsil eder ve space, büyütme için yerel arama uzayını belirtir. M_{PE} 'nin değeri, lens tarafından nesnenin büyütme aralığını hesaplayarak belirlenir; bu aralık, 10x (NA = 0.35) büyütme gücünden başlayarak 25x (NA = 0.55) büyütme gücüne kadar değişir. Objektif lens aşamasında olduğu gibi, başlangıç büyütme ölçeği (m^r), rastgele büyütme değerlerini temsil eder, 0 ila 1 arasındaki rastgele büyütme değerlerini içerir. Sınır arama alanındaki azalmanın derecesi, büyütme gücü ile belirlenmektedir ve okülerin sayısal açıklığı (NA) değerinin space ile çarpılmasıyla elde edilir.

$$M_{inew} = M_i + mr \times 0.55 \times space \quad (14)$$

Daha sonra modifiye edilmiş hedef nesne (M_{inew}), ardından mevcut nesne ile karşılaştırılır ve daha iyi bir sonuç veren seçilir ve en iyi büyütmeyi (M_{best}) temsil eder.

CEC 2019 Ölçüt Seti Özellikleri

Bu bölümde, kullanılan CEC 2019 ölçüt setinin özellikleri tablo 1'de sunulmaktadır.

Tablo 1 CEC 2019 ölçüt setindeki fonksiyonlar

Fonksiyon No	Fonksiyonlar	Boyut	Aralık
F1	Storn's Chebyshev Polynomial Fitting Problem	9	[-8192, 8192]
F2	Inverse Hilbert Matrix Problem	16	[-16384, 16384]
F3	Lennard-Jones Minimum Energy Cluster	18	[-4, 4]
F4	Rastrigin's Function	10	[-100, 100]
F5	Griewangk's Function	10	[-100, 100]
F6	Weierstrass Function	10	[-100, 100]
F7	Modified Schwefel's Function	10	[-100, 100]
F8	Expanded Schaffer's Function	10	[-100, 100]
F9	Happy Cat Function	10	[-100, 100]
F10	Ackley Function	10	[-100, 100]

Tablo 1'de görüldüğü üzere CEC 2019 ölçüt setinde toplam 10 adet fonksiyon vardır. Bu fonksiyonların belli boyut ve aralık kısıtları bulunmaktadır. Ve bu kısıtlara göre parametre değerleri ayarlanıp algoritmalar değerlendirilmektedir.

Deneysel Çalışma

Bu bölümde, deneylerin gerçekleştirildiği ortamın özelliklerinden bahsedilecektir. Deneyler, 8 GB RAM ve Intel(R) Core (TM) i7-10750H CPU (2.60GHz) içeren bir Windows 10 işletim sistemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Karşılaştırma algoritmalarını kodlamak için MATLAB R2022a kullanılmıştır. Tüm fonksiyonlar için maksimum FES sayısı 200000, popülasyon sayısı (PopN) 30 ve deney sayısı (RunN) 51 olarak ayarlanmıştır. Algoritma parametreleri literatürde orijinal makalede yer alan varsayılan değerler olarak seçilmiştir. İncelenen algoritmaların yakınsama davranışını görselleştirmek ve karşılaştırma yapmak için

MATLAB'da kullanılan yakınsama eğrisi olarak adlandırılan convergence grafiği çizdirilmiştir Her bir algoritmaya karşılık gelen tüm deneyler bağımsız olarak 51 kez çalıştırılmıştır. Algoritmaların ortalama ve standart sapma değerleri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Deneylerden elde edilen sonuçlar tablo 2'de verilmiştir. Anlaşılabilirliğin kolay olması için algoritmalar arasından elde edilen en iyi çözüm koyu renkle vurgulanmış. CEC 2019 ölçüt setinde kullanılan fonksiyonlar ve özellikleri tablo 1'de listelenmiştir. CEC 2019 ölçüt fonksiyonları için yakınsama hızı karşılaştırmaları ise tablo 3'te gösterilmiştir.

BULGULAR VE SONUÇ

Metasezgisel optimizasyon yöntemleri arasında her problemde en iyi performansı gösteren tek bir algoritma bulunmadığı için araştırmacılar için bu yöntemler günümüzde hala güncelliğini korumaktadır. Bu yüzden yalnızca yeni yöntemler önerilmekle kalınmayıp, var olan metasezgisel yöntemleri iyileştirme ve modifiye edilmeye de devam edileceği gözükmektedir. Önerilen bu yöntemler ile paralel bir şekilde, uygulama alanlarının çoğalması ve güncel problemlerin artması da bu alanın popülerliğini olumlu yönde etkilemektedir.

Yapılan bu çalışmada son yıllarda önerilen ve popüler olan 3 farklı metasezgisel optimizasyon algoritması seçilerek, optimizasyon problemlerinin performanslarının analiz edebilmek için literatürde yer alan CEC 2019 fonksiyonlarına uygulanmıştır. Karşılaştırma sonuçları tablo 2' de sunulmaktadır.

Tablo 2 NOA algoritması ile diğer algoritmaların CEC 2019 karşılaştırma sonuçları

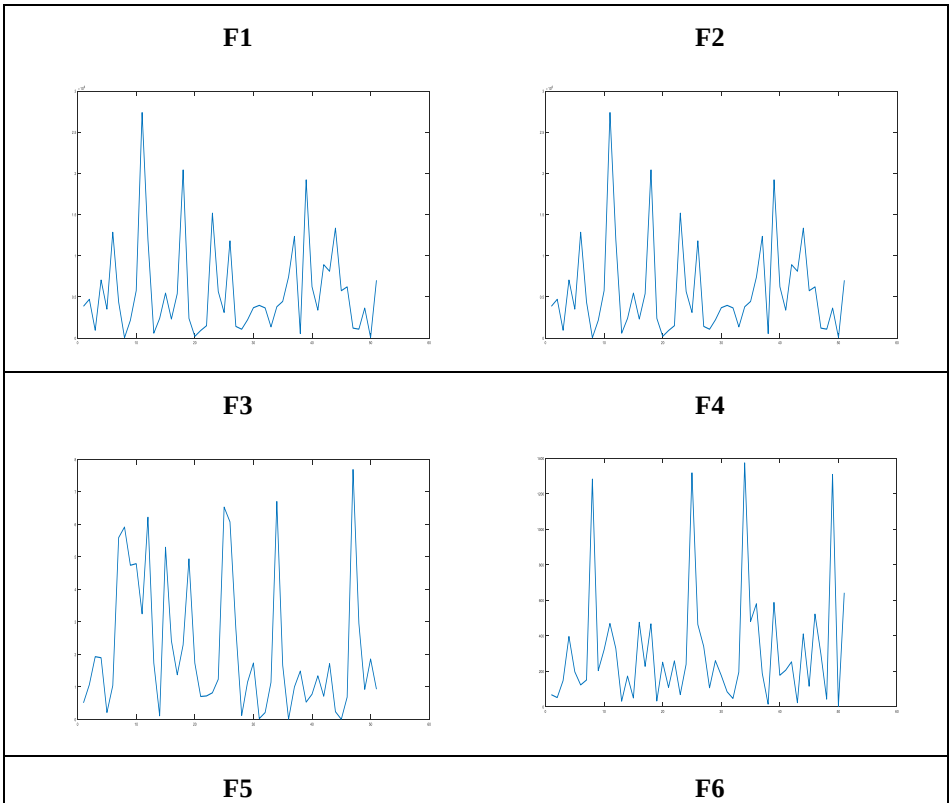
No		**Algoritmalar**		
		NOA	**DMO**	**OMA**
F1	Ortalama	**3.0000**	5.7355	6.5236
	Std. Sapma	2.411	5.6990	5.7562
F2	Ortalama	437.5321	2.2044	**2.1366**
	Std. Sapma	20.8532	1.0266	1.0266
F3	Ortalama	600.0001	**2.1896**	3.8892
	Std. Sapma	4.3985	2.1223	5.6488
F4	Ortalama	828.6505	**321.2183**	955.20
	Std. Sapma	6.7927	339.1482	40.5829
F5	Ortalama	900.4002	**228.3476**	655.2964
	Std. Sapma	1.2794	220.8289	24.0360
F6	Ortalama	1812.2444	**293.4755**	1958.1001
	Std. Sapma	**11.8444**	246.9479	25.6871
F7	Ortalama	**202.2230**	211.0833	211.0833
	Std. Sapma	7.8268	161.7822	174.26

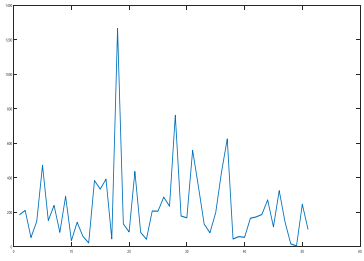
F8	Ortalama	**222.6152**	289.5260	361.2510
	Std. Sapma	3.0764	218.9758	32.4899
F9	Ortalama	**248.7812**	257.5838	287.2932
	Std. Sapma	3.2792	243.4434	269.1364
F10	Ortalama	**25.4210**	303.2376	250.1444
	Std. Sapma	0.0659	256.4987	65.2789

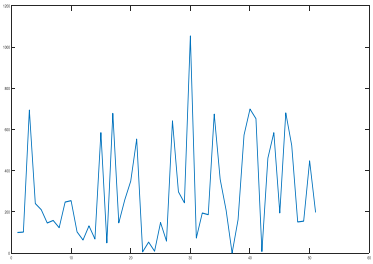
Deney sonuçları ele alındığında, bu yöntemlerin performanslarının problemin türüne göre değişkenlik gösterebileceği görülmüştür. Yapılan çalışmanın sonucunda NOA, genel performans olarak en iyi sonuçları elde ederken onu DMO izlemiştir. Sonuç olarak araştırmacılar problemlerin türlerine göre optimizasyon yöntemi seçerken, elde edilen bu sonuçları göz önünde bulundurmaları ve problemlerinin türüne göre en iyi optimizasyon algoritmasını seçmeleri gerekmektedir. Çalışma yeni çıkan güncel optimizasyon algoritmalarınında eklenmesiyle ve daha kapsamlı farklı ölçüt setleri kullanılmasıyla genişletilebilir.

Deneyler sonucunda başarılı olan NOA algoritmasının CEC 2019 ölçüt setinde kullanılan fonksiyonlarının yakınsama grafikleri tablo 3'te sunulmaktadır.

Tablo 3 NOA algoritmasının CEC 2019 ölçüt setinde kullanılan fonksiyonların yakınsama grafikleri

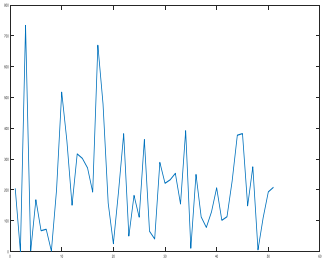


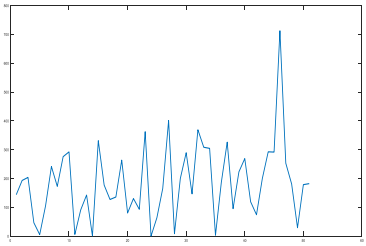




F7

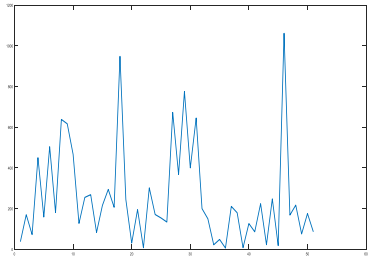
F8

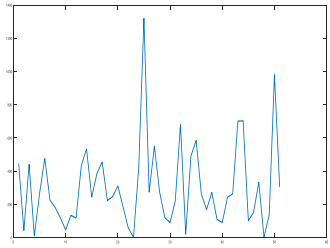




F9

F10





REFERANSLAR

Abdel-Basset, M., Mohamed, R., Jameel, M., & Abouhawwash, M. (2023). Nutcracker optimizer: A novel nature-inspired metaheuristic algorithm for global optimization and engineering design problems. *Knowledge-Based Systems*, *262*, 110248. https://doi.org/10.1016/j.knosys.2022.110248

Agushaka, J. O., Ezugwu, A. E., & Abualigah, L. (2022). Dwarf Mongoose Optimization Algorithm. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, *391*, 114570. https://doi.org/10.1016/j.cma.2022.114570

Alatas, B. (2019). Sports inspired computational intelligence algorithms for global optimization. *Artificial Intelligence Review*, *52*(3), 1579-1627. https://doi.org/10.1007/s10462-017-9587-x

Altay, O. (2022). Chaotic slime mould optimization algorithm for global optimization. *Artificial Intelligence Review*, *55*(5), 3979-4040. https://doi.org/10.1007/s10462-021-10100-5

Altay, O., & Varol Altay, E. (2023). A novel chaotic transient search optimization algorithm for global optimization, real-world engineering problems and feature selection. *PeerJ Computer Science*, *9*, e1526. https://doi.org/10.7717/peerj-cs.1526

Cheng, M.-Y., & Sholeh, M. N. (2023). Optical microscope algorithm: A new metaheuristic inspired by microscope magnification for solving engineering optimization problems. *Knowledge-Based Systems*, *279*, 110939. https://doi.org/10.1016/j.knosys.2023.110939

Dumlu, H., & Yavuz, G. (t.y.). *CEC 2019 Problemleri İçin Kendinden Uyarlamalı Bir Diferansiyel Gelişim Algoritması A Self-Adaptive Differential Evolution Algorithm for CEC 2019 Problems*.

Eroz, E., & Tanyildizi, E. (2018). Güncel Metasezgisel Optimizasyon Algoritmalarının Performans Karşılaştırılması. *2018 International Conference on Artificial Intelligence and Data Processing (IDAP)*, 1-16. https://doi.org/10.1109/IDAP.2018.8620764

Faramarzi, A., Heidarinejad, M., Mirjalili, S., & Gandomi, A. H. (2020). Marine Predators Algorithm: A nature-inspired metaheuristic. *Expert Systems with Applications*, *152*, 113377. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.113377

Hashim, F. A., Hussain, K., Houssein, E. H., Mabrouk, M. S., & Al-Atabany, W. (2021). Archimedes optimization algorithm: A new metaheuristic algorithm for solving optimization problems. *Applied Intelligence*, *51*(3), 1531-1551. https://doi.org/10.1007/s10489-020-01893-z

Heidari, A. A., Mirjalili, S., Faris, H., Aljarah, I., Mafarja, M., & Chen, H. (2019). Harris hawks optimization: Algorithm and applications. *Future Generation Computer Systems*, *97*, 849-872. https://doi.org/10.1016/j.future.2019.02.028

Houssein, E. H., Oliva, D., Samee, N. A., Mahmoud, N. F., & Emam, M. M. (2023). Liver Cancer Algorithm: A novel bio-inspired optimizer. *Computers in Biology and Medicine*, *165*, 107389. https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2023.107389

Kaveh, A., & Bakhshpoori, T. (2016). Water Evaporation Optimization: A novel physically inspired optimization algorithm. *Computers & Structures*, *167*, 69-85. https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2016.01.008

Li, M. D., Zhao, H., Weng, X. W., & Han, T. (2016). A novel nature-inspired algorithm for optimization: Virus colony search. *Advances in Engineering Software*, *92*, 65-88. https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2015.11.004

Li, S., Chen, H., Wang, M., Heidari, A. A., & Mirjalili, S. (2020). Slime mould algorithm: A new method for stochastic optimization. *Future Generation Computer Systems*, *111*, 300-323. https://doi.org/10.1016/j.future.2020.03.055

Mirjalili, S. (2016). SCA: A Sine Cosine Algorithm for solving optimization problems. *Knowledge-Based Systems*, *96*, 120-133. https://doi.org/10.1016/j.knosys.2015.12.022

Mirjalili, S., & Lewis, A. (2016). The Whale Optimization Algorithm. *Advances in Engineering Software*, *95*, 51-67. https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2016.01.008

Mohamed, A. W., Hadi, A. A., Mohamed, A. K., & Awad, N. H. (2020). Evaluating the Performance of Adaptive GainingSharing Knowledge Based Algorithm on CEC 2020 Benchmark Problems. *2020 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC)*, 1-8. https://doi.org/10.1109/CEC48606.2020.9185901

Nadimi-Shahraki, M. H., Taghian, S., & Mirjalili, S. (2021). An improved grey wolf optimizer for solving engineering problems. *Expert Systems with Applications*, *166*, 113917. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.113917

Sadollah, A., Eskandar, H., Bahreininejad, A., & Kim, J. H. (2015). Water cycle algorithm for solving multi-objective optimization problems. *Soft Computing*, *19*(9), 2587-2603. https://doi.org/10.1007/s00500-014-1424-4

Zhou, Y., Wang, Y., Chen, X., Zhang, L., & Wu, K. (2017). A novel path planning algorithm based on plant growth mechanism. *Soft Computing*, *21*(2), 435-445. https://doi.org/10.1007/s00500-016-2045-x

BÖLÜM 31

Taramalı Elektron Mikroskop Teknolojisinde Gelişmeler

Gülşah Germen Tutaş[1] & Esra Kılavuz[2]

[1] Öğr. Gör. Niğde Ömer Halis Üniversitesi, Endüstriyel Hammaddeler ve Yapı Malzemeleri Uygulama ve Araştırma Merkezi , Orcid:0000-0002-7705-7465
[2] Dr, . Niğde Ömer Halis Üniversitesi Merkezi araştırma Laboratuvarı,
ORCID: 0000-0001-9324-5346

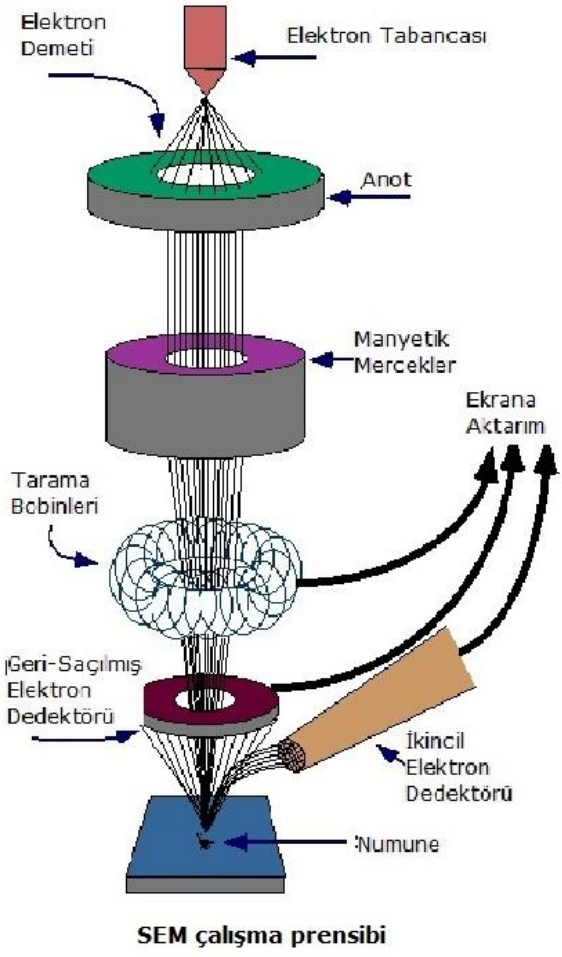
1.1 TARAMA ELEKTRON MİKROSKOBU

Taramalı elektron mikroskobu (SEM), 1958'de geliştirilmesinden bu yana görüntüleme, üretim, desenleme ve kimyasal analiz gibi alanlarda en yaygın ve yüksek performanslı görüntüleme teknolojilerinden biri olarak kabul görmüştür. Günümüzde dünya genelinde yaklaşık 150.000 cihazın kullanıldığı tahmin edilmektedir. Bu cihazlar, basit masaüstü sistemlerinden 5 milyon doları aşabilen gelişmiş alan emisyonlu sistemlere kadar geniş bir yelpazeye sahiptir.

Taramalı elektron mikroskobunun temel prensibi oldukça basittir. Bir elektron ışını, genellikle çapı bir santimetrenin çok küçük bir kısmından, binlerce kat daha küçük bir noktaya odaklanır. Bu elektronların enerjisi 100 eV'den 30 keV veya daha fazlasına kadar değişebilir. Işın noktası, ilgi alanı boyunca genellikle doğrusal bir "raster" deseninde taranır (Şekil 1.1), ancak özel amaçlar için bazen radyal ışın gibi farklı desenler de kullanılabilir. Toplamda, elde edilen görüntü, genellikle 1000 x 1000 veya daha fazla bireysel görüntüleme noktası içerir.

Olay elektron ışını, elastik veya elastik olmayan saçılma yoluyla örnekteki atomlarla etkileşime girebilir. Elastik saçılmada, elektronlar enerji kaybetmeden yön değiştirir. Elastik olmayan saçılmada ise elektronlar enerji kaybeder ve bu, örnek atomlarını iyonlaştırabilir. Olay elektronları (elastik ve elastik olmayan saçılmalarla) örneğin "etkileşim hacmi" olarak adlandırılan bölgesinde birçok kez saçılır. Etkileşim hacminin boyutu, elektron enerjisine ve örneğin özelliklerine bağlıdır, ancak çapı genellikle bir mikron civarındadır. Işın ve örnek arasındaki etkileşimle üretilen çeşitli sinyaller tespit edilebilir. Sinyalin yoğunluğu, probun konumuna göre bir görüntü oluşturmak için çizilir. İki ana sinyal, ikincil elektronlar (SE'ler) ve geri saçılmış elektronlardır (BSE'ler). İkincil elektronlar, iyonizasyonla örnek atomlarından salınan, enerjisi düşük (<~25 eV) ve yalnızca yüzeyin en üst katmanlarından kaçabilen elektronlardır, bu yüzden yüzeyin topografik görüntüsünü oluştururlar. Geri saçılmış elektronlar ise, birçok kez saçılıp yüzeyden geri dönen olay elektronlarıdır. Bu elektronların yüzeye dönme oranı, atom numarasına (Z) bağlıdır, bu yüzden BSE görüntüleme bileşimsel kontrast sağlar. Ayrıca, iyonize olmuş atomların bozunmasından yayılan X-ışınları da yaygın olarak tespit edilir. Yayılan X-ışını fotonlarının enerjisi iyonize elemente özgüdür; bu yüzden enerji dağılımlı X-ışını (EDX) spektroskopisi ile elementlerin belirlenmesi mümkündür. Çoğu modern SEM, istenildiği gibi diğer analitik ve görüntüleme modlarını en iyi şekilde tespit etmek, yakalamak, toplamak ve görüntülemek için muhtemelen birkaç tür dedektöre sahip olacak ve bunları kullanacaktır. Çalışma sırasında elektron kaynağı, elektronlar için en küçük nokta

boyutunu oluştururken, numuneye ulaşan ışın akımının herhangi bir operatör etkileşimine gerek kalmadan saatlerce yeterince kararlı olmasını sağlayacak şekilde dikkatlice ayarlanmalı ve optimize edilmelidir.



Şekil 1.1 Bir taramalı elektron mikroskobunun temel şeması

Bir taramalı elektron mikroskobu (SEM) kolonunda bulunan temel parçalar, cihazın yüksek çözünürlüklü görüntü elde etmesi için kritik öneme sahiptir. SEM kolonundaki ana bileşenler:

1. Elektron Tabancası (Electron Gun): Elektron kaynağını sağlar ve elektronların yayılmasını başlatır. En yaygın kullanılan türleri tungsten filament, LaB_6 (lantan hekzaborür) tabancalar ve alan emisyonlu tabancalardır.

2. Kondenser Mercekler (Condenser Lenses): Elektron ışınının çapını ve akısını ayarlayarak odaklanmasına yardımcı olur. Işının istenen nokta boyutuna ulaşması için önemlidir.

3. Tarak Merceği veya Objektif Mercek (Objective Lens): Işını örnek üzerine son kez odaklar. Yüksek çözünürlük için çok küçük bir noktaya odaklanmasını sağlar.

4. Tara Üretici Bobinler (Scan Coils): Elektron ışınının örnek yüzeyinde istenen desen boyunca hareket etmesini sağlar. Genellikle doğrusal bir "raster" tarama deseninde hareket ettirir.

5. Stigmator: Işının simetrisini ayarlayarak odaklanmasını sağlar. Merceklerin neden olduğu astigmatizmayı düzelterek daha net görüntüler elde edilmesine yardımcı olur.

6. Dedektörler:

- İkincil Elektron Dedektörü (SE Dedektörü): Yüzey topografyasını oluşturan düşük enerjili ikincil elektronları tespit eder.

- Geri Saçılmış Elektron Dedektörü (BSE Dedektörü): Yüzey bileşimine dayalı kontrast oluşturan geri saçılmış elektronları tespit eder.

- X-Işını Dedektörü: Enerji dağılımlı X-ışını (EDX) spektroskopisi ile element analizinde kullanılır.

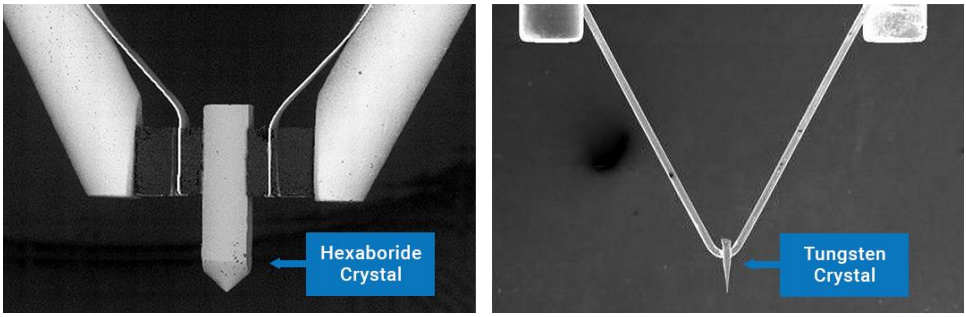
7. Vakum Sistemi: Elektronların örnekle etkileşime geçmeden önce hava molekülleriyle çarpışmasını önlemek için SEM kolonunu yüksek vakumda tutar.

1.2. Termiyonik ve Alan Emisyon Kaynakları- FESEM

Elektron kaynağı, taramalı elektron mikroskobunun (SEM) en kritik bileşenlerinden biridir çünkü görüntüleme için kullanılan elektron ışınının kalitesini, parlaklığını ve boyutunu belirler. Elektron ışınının özellikleri, SEM'in genel görüntüleme yeteneklerini etkileyecektir. SEM'lerde kullanılan iki yaygın elektron kaynağı türü termiyonik ve alan emisyon tabancalarıdır. Her biri, elektromanyetik lensler kullanılarak hızlandırılan ve numune yüzeyine odaklanan ilk elektron akışını üretmek için farklı mekanizmalara güvenir.

SEM enstrümantasyonunu değerlendirirken genellikle amaçlanan uygulamanız için doğru elektron kaynağını seçmek ilk adımdır. Her bir elektron kaynağı

türünün nasıl çalıştığı ve bir mikroskobun yeteneklerini nasıl etkilediği konusunda sağlam bir anlayışa sahip olmak önemlidir. Bu blog, ideal SEM sisteminizi seçmenize yardımcı olmak için termiyonik ve alan emisyonlu elektron kaynakları arasındaki temel farklara dair kısa bir genel bakış sunmayı amaçlamaktadır.

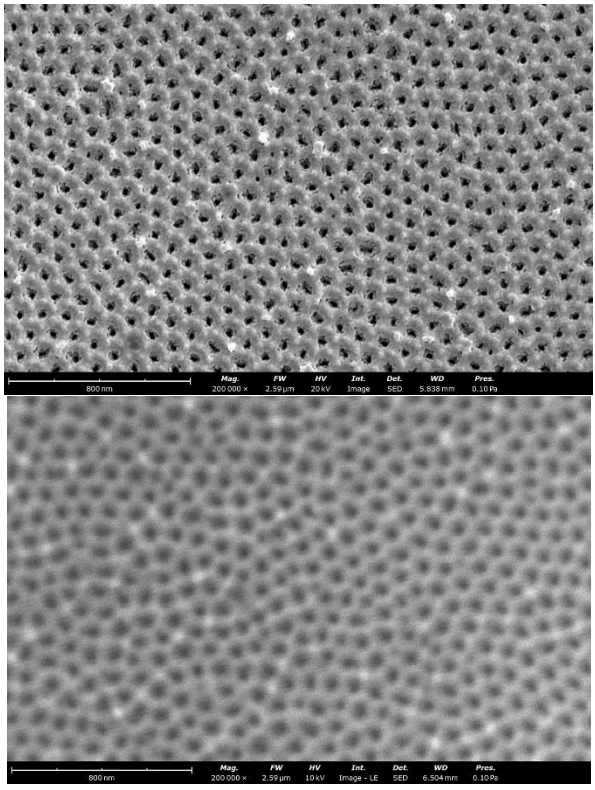


Şekil 1.2 Termiyonik elektron kaynağının (sol) ve Phenom Pharos'un alan emisyon tabancasının (sağ) SEM görüntüleri, elektronların yayıldığı uç malzemesini göstermektedir.

Termiyonik emisyon, bir malzeme ısıtıldığında yüzeyinden elektronların yayıldığı süreci ifade eder. Termiyonik elektron tabancaları, keskinleştirilmiş bir uç haline getirilmiş CeB_6 veya LaB_6 gibi bir tungsten tel filament veya katı hal hekzaborür kristali içerir. Elektronlar, elektronları işlevin üstesinden gelip kolona kaçacak kadar enerji kazanana kadar kaynak malzemeyi ısıtarak yayılır (Nano Science Instrument. “Thermionic vs. Field Emission Sources: 4 Key Differences” https://www.nanoscience.com/blogs/thermionic-vs-field-emission-sources-4-key-differences/).

Elektronların alan emisyonu, güçlü bir elektrik alanının varlığı nedeniyle bir malzemenin yüzeyinden elektronlar yayıldığında meydana gelir. Alan emisyon silahları, tek kristal tungstenden yapılmış son derece keskin bir metal uç kullanır. Bir anot tarafından bir elektrik alanı uygulanır ve alan, ucun yüzeyinde yoğunlaşarak tünelleme ve elektron emisyonuna neden olur.

Elektron kaynaklarının çözünürlük yeteneği açısından, alan emisyon tabancası üstündür. Alan emisyon tabancasının daha küçük bir uç yayma çapı vardır ve yayılan elektronlar daha dar bir enerji yayılımına sahiptir, bu hem küçük bir proba odaklanma yeteneğini artırır hem de numune yüzeyindeki ince yapıları haritalandırır.



Şekil 1.3 Farklı tipte elektron kaynaklarıyla donatılmış SEM'ler kullanılarak aynı alümina ince film örneğinden alınmıştır. Phenom Pharos'un (sol) Phenom XL'e (sağ) kıyasla gösterdiği gelişmiş çözünürlük, XL'in CeB 6 tabanlı termiyonik elektron kaynağına kıyasla Pharos'un alan emisyon tabancasına atfedilebilir (Nano Science Instrument. "Thermionic vs. Field Emission Sources: 4 Key Differences" https://www.nanoscience.com/blogs/thermionic-vs-field-emission-sources-4-key-differences/).

Alan yayıcı elektron kaynağı kullanan alan emisyonlu mikroskopi (FEG), yüksek çözünürlüklü görüntüleme sağlamak için geliştirilmiş ve özellikle ince ayrıntıları görüntüleyebilen bir tekniktir (Pawley 1997). FEG tabanlı bu taramalı elektron mikroskoplarına, yayıcı türünü vurgulamak için Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskobu (FESEM) adı verilir. FESEM, klasik SEM'den farklı olarak düşük voltajlarda bile çok ince özellikleri ve küçük topografik ayrıntıları gözlemleme kabiliyeti sunar ve çoğu araştırma laboratuvarında kullanılan standart SEM cihazlarından daha yüksek büyütmelere ulaşabilir (Jang et al. 2006). FESEM, biyoloji, kimya ve fizik araştırmalarında 1 nanometre kadar küçük yapıları görüntülemek için ideal bir tekniktir. Hücre içi organellerin, DNA'nın, sentetik polimerlerin ve mikroçip kaplamalarının ayrıntılı görüntülenmesi gibi çeşitli uygulama-

larda kullanılır. Alan emisyonlu SEM'ler, geleneksel SEM'lere kıyasla daha parlak bir elektron kaynağına ve daha küçük bir ışın boyutuna sahiptir; bu da yararlı büyütmeyi 500.000x'e kadar artırarak gözlem ve analiz olanaklarını genişletir. FESEM'in bir diğer avantajı, düşük hızlandırma voltajlarıyla yüksek çözünürlüklü görüntüleme yapabilmesidir. Bu özellik, özellikle çok ince yüzey ayrıntılarının, elektron ışınına duyarlı malzemelerin ve iletken olmayan yüzeylerin gözlemlenmesinde büyük fayda sağlar. FESEM, neredeyse sınırsız bir alan derinliği sunarak, 10x ila 3.000.000x arası büyütmelerde topografik ve kimyasal bilgilerin yüksek hassasiyetle elde edilmesine olanak tanır. Geleneksel SEM'e kıyasla, FESEM 1-2 nanometreye kadar uzaysal çözünürlük sağlayarak net, daha az elektrostatik bozulmaya sahip görüntüler üretir; bu da üç ila altı kat daha yüksek çözünürlük anlamına gelir (Senthil Prabhu et al. 2021).

Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskobu (FESEM) arasındaki temel farklar, kullanılan elektron kaynağı, çözünürlük, büyütme kapasitesi ve düşük voltajda çalışma yetenekleri gibi özelliklere dayanır. İşte SEM ve FESEM arasındaki başlıca farklar:

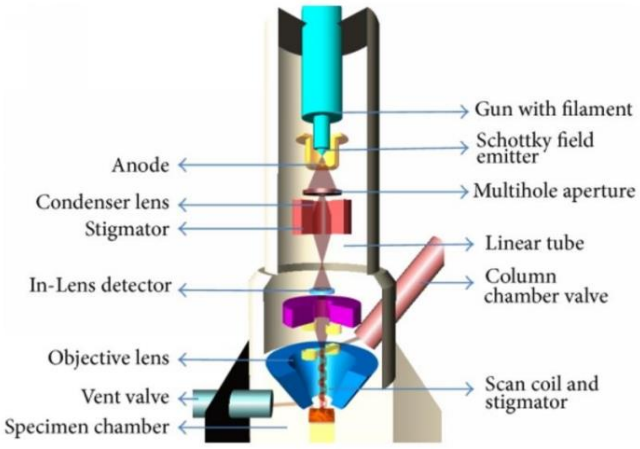
1. **Elektron Kaynağı**:

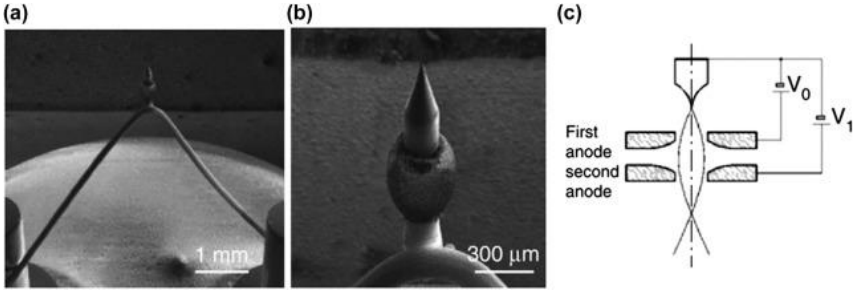
SEM: Elektron kaynağı olarak genellikle tungsten filament veya lantan hekzaborür (LaB_6) tabancaları kullanır.

FESEM: Alan emisyonlu bir elektron kaynağı (Field Emission Gun, FEG) kullanır. FEG, elektronları daha parlak ve odaklanmış bir ışın halinde üretir, bu da görüntü kalitesini artırır.

FESEM ile SEM arasındaki en büyük fark, elektron üretim sisteminde bulunur. FESEM, elektron kaynağı olarak, son derece odaklanmış yüksek ve düşük enerjili elektron ışınları üreten bir alan emisyon tabancası kullanır. Bu, mekansal çözünürlüğü büyük ölçüde iyileştirirken, çok düşük voltajlarda (0,02-5 kV) çalışmaya olanak tanır. Bu düşük voltajda çalışma, iletken olmayan örneklerde şarj etkisini en aza indirir ve elektron ışınına duyarlı örneklerin zarar görmesini önlemeye yardımcı olur (Erlandsen, Frethem, and Chen 2000).

FESEM'in bir diğer önemli özelliği ise, yüksek çözünürlükte ve düşük ivme voltajında görüntüleme için optimize edilmiş lens içi dedektörler kullanmasıdır. Bu dedektörler, Şekil 1.4'de gösterildiği gibi, cihazın maksimum performans sağlamasında kritik rol oynar.





Şekil 1.4 FESEM genel şeması (üstte) (a) Sivri uçlu FEG, (b) ucun yüksek büyütmeli görüntüsü ve (c) FEG çalışma prensipleri (Zhou et al. 2007).

Önemli bir elektrik potansiyeli gradyanı uygulandığında ve diğer elektron kaynağı türlerinde termiyonik etkiler kullanmak yerine anotlara doğru çekildiğinde güçlü bir elektrik alanı üretilir. Çalışma prensipleri, ilk anot kullanılarak elektronları çıkararak ve ikinci anot kullanılarak hızlandırarak elektron ışınlarını kontrol eden bir elektrostatik mercek görevi gören iki kat anot içerir (Şekil 1.4(c)).

FEG üç türe ayrılır: soğuk alan emisyonu (CFE), termal alan emisyonu (TFE) ve Schottky emisyonu (SC) kaynakları (Hashimoto et al. 2020). CFE'de elektron emisyonu oda sıcaklığında çalışır ve tamamen elektrotlar arasında maruz kalan elektrik alanına bağlıdır. Elektron ışınının ve emisyon alanının küçük çapı nede-

niyle, yayılan elektron ışınının düşük akımına rağmen yüksek parlaklık elde edilebilir. Bununla birlikte, uzun bir çalışma süresinden sonra, FEG'nin ucunda emilen gaz katmanları oluşacak ve kararsız akım emisyonuna neden olabilir. Gaz katmanları, yaklaşık 2500K'de kısa bir uç ısıtma patlaması olan flaş işlemiyle giderilebilir (Bogner et al. 2007). Öte yandan, TFE yüksek sıcaklıkta (1800K) çalıştırıldı, bu da gaz moleküllerinin emilimini en aza indirdi ve bozulmuş vakum koşullarında bile elektron emisyonunun kararlılığını artırdı. SC, CFE'ye benzer, ancak benzer enerjide sağlanan CFE'ye kıyasla daha büyük elektron kaynakları bakımından farklılık gösterir. Daha büyük elektron kaynağı boyutu, SC'nin titreşimleri önlemesini sağlamıştır.

Termiyonik kaynaklarla karşılaştırıldığında, FEG yüksek elektron parlaklığı, minimum işlev üretebilir ve daha yüksek çözünürlüklü FESEM görüntüleri yakalayabilir. Bununla birlikte, elektron kararlılığını sağlamak ve katot kontaminasyonunu engellemek için elektron kaynağı çalışma sırasında yüksek vakum ortamına (10−9 Torr'dan yüksek) yerleştirilmelidir. Dahası, FEG elektron kaynakları da düşük ışın akımı kararlılığından muzdariptir (Pawley 1997).

FESEM İçin Örnek Gereksinimleri

- Örnek kuru ve manyetik olmayan özellikte olmalıdır.

- Toz, metal ve ince film örnekleri analiz için uygundur. Eğer toz örnekler >100 nm boyutunda partiküller içeriyorsa, kullanıcının bu örnekleri uygun bir çözücüde çözerek iletken bir substrat üzerine damlatma veya spin kaplama yöntemiyle hazırlaması gerekir. Örnek olarak bakır, alüminyum folyo veya silikon substrat kullanılabilir. Bu detaylar operatörle görüşülerek netleştirilebilir.

- Biyolojik ve sıvı örnekler analiz öncesinde sabitlenmeli, ardından iletken substratlar üzerine kaplanmalı veya 1 cm boyutunda damlatılmalıdır. Bu örnekler, ayrılan analiz süresinden önce tamamen kurutulmalıdır.

- En az 10 mg örnek miktarı gereklidir.

FESEM Uygulamaları

- Yarı iletken cihazlarda kapı genişliği, kapı oksitleri, film kalınlığı ve yapı detayları için kesit analizleri

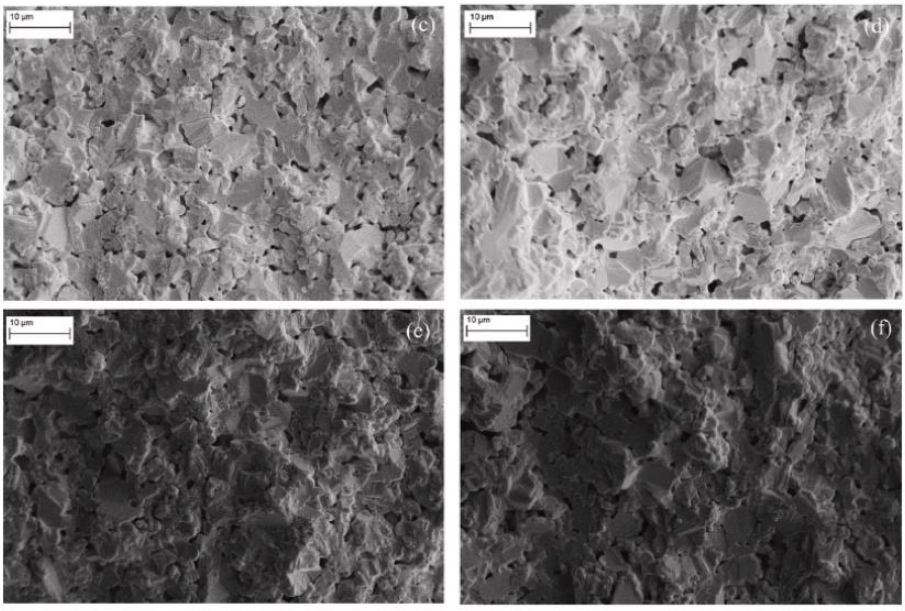
- Gelişmiş kaplama kalınlığı ve yapı uniformitesi belirleme

- Küçük kirlenme geometrisi ve elemental bileşim ölçümü

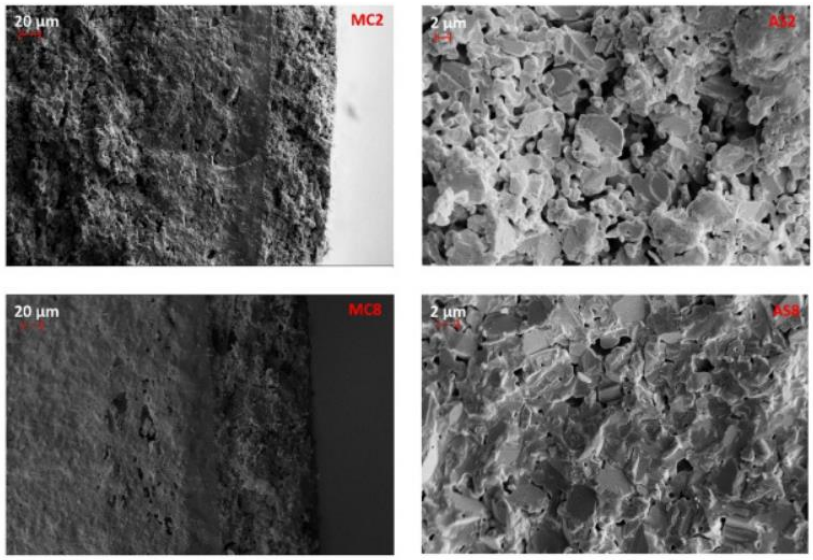
- Mikroskobik özellik ölçümleri

- Korozyon değerlendirmesi

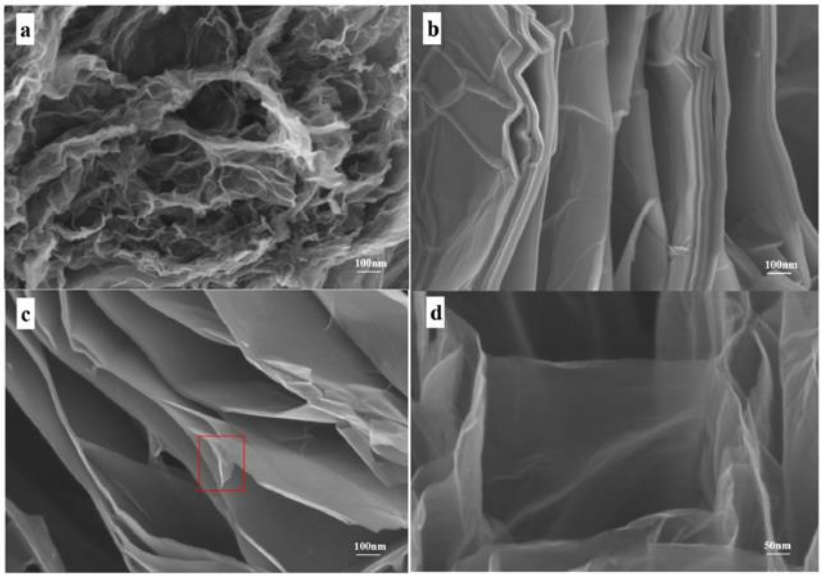
- Spreyle kurutulmuş toz değerlendirmesi
- Transdermal film incelemeleri
- Yüksek çevrimli yorgunluk kırıkları için çizgi ölçümleri
- Tabletlerde kaplama değerlendirmesi
- İnce numune özelliklerinin detaylı karakterizasyonu
- Polimerler ve çok küçük bileşenler için kırılma analizi
- Yüzey kirlenme analizi
- Küçük bileşen malzeme incelemesi
- Lazer ve direnç kaynağı değerlendirmesi
- Basılı ve entegre devre analizi
- Mikro yapı çalışmaları.



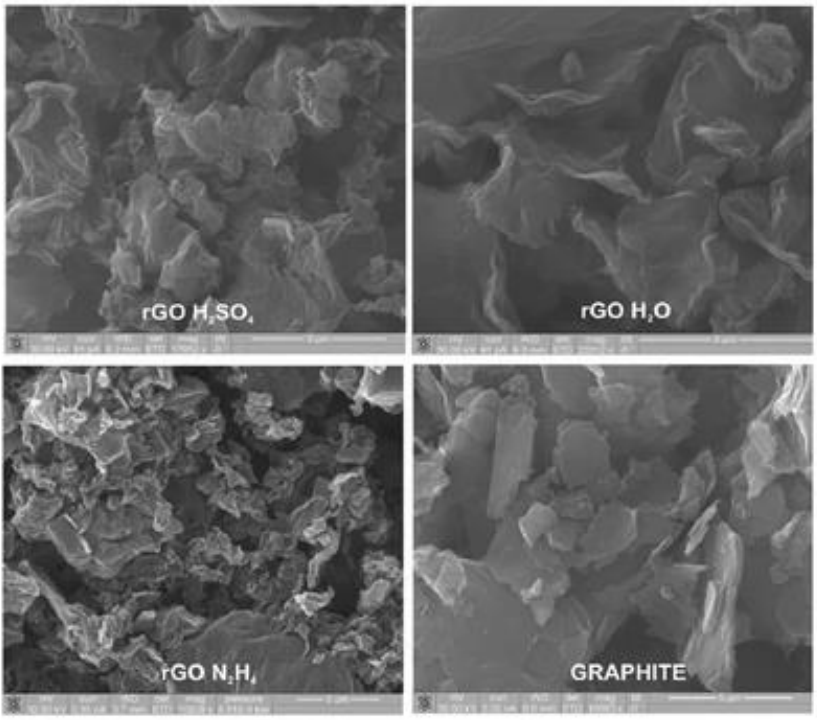
Şekil 1.5 Katı Yakıt Oksit Pilleri FESEM görüntüleri (Altan et al. 2024)



Şekil 1.6 Katı Oksit Yakıt Pilleri SEM görüntüleri (Tutas et al. 2025)



Şekil 1.7 Grafen ve grafen oksit yapılarının FESEM görüntüleri (Fu et al. 2022)



Şekil 1.8 7 Grafen ve grafen oksit yapılarının SEM görüntüleri (Hayes et al. 2015)

1.3 Çevresel SEM

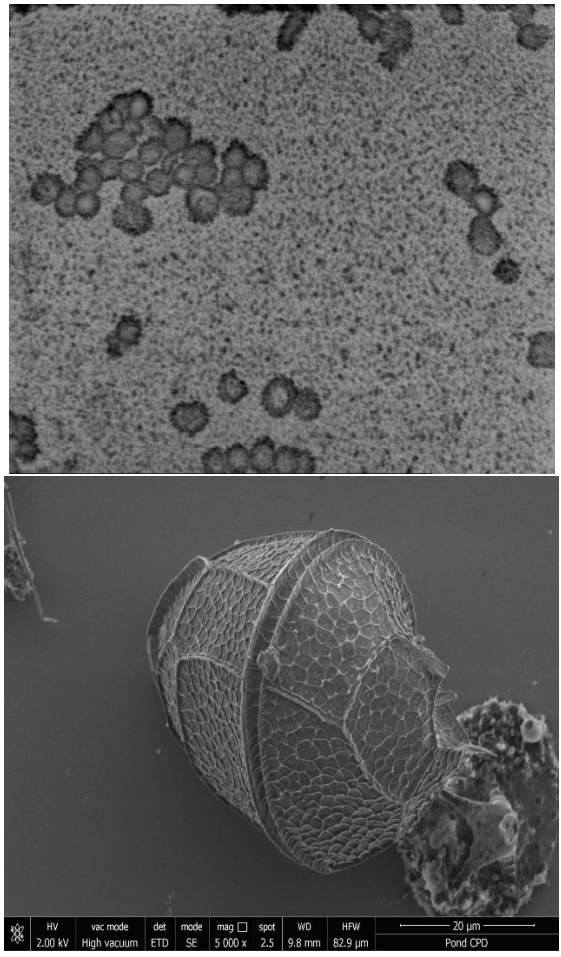
Çevresel taramalı elektron mikroskobu (ESEM), numune haznesinde gazlı bir ortam sağlayarak ıslak, kaplanmamış veya her iki özelliğe sahip numunelerin görüntülenmesine imkân tanıyan bir taramalı elektron mikroskobu (SEM) türüdür. Geleneksel SEM'lerde modifikasyon yapılarak iç haznede ıslak numunelerin görüntülenmesi mümkün olsa da, ESEM, özel elektron dedektörleri (örneğin standart Everhart-Thornley dedektörü yerine farklı dedektörler) ve diferansiyel pompalama sistemleri sayesinde öne çıkar. Bu sistemler, elektron ışınının tabanca bölgesindeki yüksek vakumdan numune haznesindeki yüksek basınca geçişine olanak tanır. Böylece ESEM, numuneleri doğal ortamlarında görüntülemek amacıyla özel olarak tasarlanmış tam donanımlı ve benzersiz bir cihazdır. Cihazın tasarımı, New South Wales Üniversitesi'nde çalışan Gerasimos Danilatos tarafından gerçekleştirilmiştir(Bai et al. 2024).

Çevresel taramalı elektron mikroskobunun (ESEM) son yıllardaki gelişmeleri, numuneleri "doğal" koşullarına mümkün olduğunca yakın bir ortamda ve mini-

mum hazırlıkla inceleme ihtiyacına çözüm sunmaktadır. ESEM, su buharı, nitrojen, argon veya karbondioksit gibi gazları kullanarak nispeten yüksek basınçlarda (~50 Torr'a kadar) çalışabilir, bu sayede nemli numuneleri görüntüleyebilir. ESEM'in elektron tabancası ve kolonunun tasarımı büyük ölçüde geleneksel bir SEM'e benzese de, ESEM'in numune haznesinde yüksek basıncı koruyabilmek için kolonunda bir dizi açıklık bulunur. Bu açıklıklar, elektron ışınını numune haznesindeki gaz molekülleriyle etkileşime girene kadar korur ve elektron saçılmasını en aza indirerek basınç farkını yaklaşık 2-3 büyüklük sırasına kadar muhafaza eder(Wan et al. 2021).

Elektron ışınının gaz molekülleriyle çarpışması, ışının dağılmasına yol açar ve bu durum ESEM görüntülerinin mekansal çözünürlüğünde bir miktar kayba neden olur. Ancak gaz molekülleri, aynı zamanda ikincil elektron (SE) amplifikasyonu için işlev görür. Numuneden yayılan ikincil elektronlar gaz moleküllerini iyonize eder ve bu iyonize gaz molekülleri, ek gaz moleküllerinin de iyonize olmasına neden olur. Bu süreçte ortaya çıkan elektronlar, pozitif önyargılı gazlı SE dedektörü tarafından toplanır. Ayrıca, haznede kalan pozitif yüklü gaz iyonları, numunede oluşabilecek elektriksel yüklenmeyi nötralize eder ve bu özellik ESEM'i yalıtkan numuneleri incelemek için ideal bir araç haline getirir.

ESEM'in mekansal çözünürlüğü, numune haznesinde gaz molekülleriyle etkileşen olay elektronlarının saçılma derecesiyle sınırlıdır. Yüksek basınç koşullarında yaklaşık 5 nm çözünürlük elde edilebilir. Numune haznesi basıncı azaldıkça, çözünürlük de artar.



Şekil 1.9 WetSTEM cihazı ile alınmış influenza virüs SEM görüntüleri (sol). MPI havuzundan bir dinoflagellata ait SEM görüntüsü (CPD ile hazırlanmıştır). (© Max Planck Deniz Mikrobiyolojisi Enstitüsü, S. Littmann)(sağ)

1.4 Düşük Vakumlu SEM

Düşük vakum, kaplanmamış numunelerin görüntülenmesine olanak tanıyan taramalı elektron mikroskobunda (SEM) kullanılan bir tekniği ifade eder ve yirmi yıldan uzun süredir kullanılmaktadır. Teknik, düşük vakum, değişken basınç ve ıslak SEM dahil olmak üzere bir dizi terimle bilinir ve özellikle numunelerin kaplanamadığı veya SEM içindeki yüksek vakum ortamına dayanacak kadar sağlam olmadığı uygulamalar için uygundur (Şekil 1.10). Biyolojik malzeme yumuşak dokudan ve sudan, bunların hiçbiri geleneksel bir SEM ile ilişkili yüksek basınçlara dayanamaz. Bu tür materyaller normalde kimyasal fiksasyon, kritik nokta

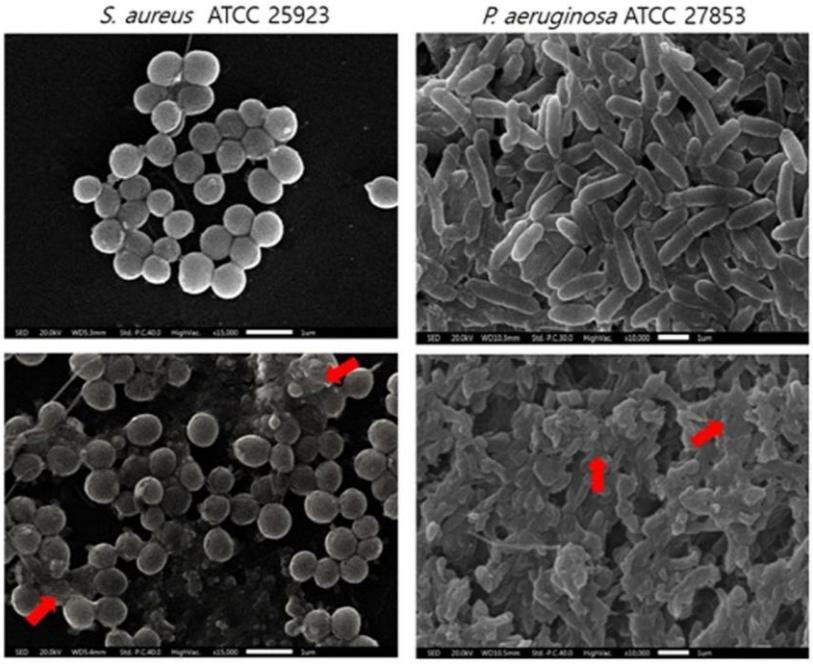
kurutma ve kaplama veya kriyo hazırlama sonrasında görüntülenir. Düşük vakumlu SEM, numune odası ve mikroskop kolonu arasında diferansiyel basınç uygulanması yoluyla bu tür materyalin incelenmesini sağlar.

Geleneksel taramalı elektron mikroskobu (SEM) analitik bir araç olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bununla birlikte, gözlemlenebilecek numune türleri üzerinde çeşitli sınırlamalar vardır. Bir numune iletken olmayan bir malzemeden oluştuğunda veya numune zeminine uygun şekilde topraklanmadığında, yüklenme meydana gelir . Yüklenme, numunenin yüzeyinde fazla elektron birikmesidir ve bu da birçok istenmeyen durumlara neden olur. SEM gözlemleri için kullanılan hem ikincil hem de geri saçılan elektronlar önemli ölçüde etkilenir.

Düşük Vakum SEM odasının vakumu, 20-2000 Pa seviyelerinde H2O veya N2 gibi gaz moleküllerinin eklenmesiyle değiştirilebilir (kesin değerler cihaza bağlıdır). Gaz, elektron demetiyle etkileşime girerek numunenin yüzeyinde biriken fazla elektronları nötralize eden katyonlar oluşturur ve böylece yüklenme etkilerini önler. Düşük vakum koşulları altında SEM görüntüleme, değişen vakum ve gaz seviyeleri altında yayılan sinyali toplamak için tasarlanmış özel dedektörler gerektirir. Görüntü çözünürlüğü, gaz özelliklerinin (kimya ve basınç) yanı sıra hızlandırma voltajıyla da değişebilir. DV SEM'ler, iletken olmayan ve kaplanamayan organik ve inorganik malzemelerin görüntülenmesinin yanı sıra gaz çıkaran numuneler için de çok kullanışlıdır. DV SEM teknikleri hem malzeme bilimi hem de yaşam bilimi örnekleri için uygulanabilir(Toth, Thiel, and Donald 2003).

Düşük Vakumlu SEM' lerde objektif merceğinin alt kısmı ile numune odası arasında küçük bir delik (orifis) vardır, ancak DV-SEM'deki diferansiyel pompalama sistemi sayesinde objektif merceğinin üzerindeki kısım, numune odasının düşük vakumundan etkilenmeden güvenli bir şekilde yüksek vakumda tutulur. Mikroskop kolonu ve tabanca alanları, döner ve yağ difüzyonu veya turbo moleküler pompalar gibi geleneksel yöntemlerle yüksek vakuma pompalanır. Gerekli basınç, elektron kaynağının türüne göre belirlenir. Mikroskop haznesi yalnızca döner bir pompa ile boşaltılır ve bu da numune haznesindeki elde edilebilir basıncı sınırlar. Hazne ve kolon arasında elde edilen diferansiyel vakum, kutup parçasının tabanındaki bir basınç sınırlayıcı açıklık(lar) ile sınırlandırılır. Haznede hala bulunan gaz molekülleri, kaplanmamış numunelerin yüzeyinde birikebilecek yükü iyonize eder. Haznede bulunan gaz miktarı, manuel veya bilgisayar kontrollü bir iğne valfi kullanılarak değiştirilebilir. Çoğu düşük vakumlu SEM, 10 ile 1000 µm arasında bir hazne basıncıyla çalışacaktır. Düşük vakumlu SEM (DV-SEM), numune haznesindeki basıncı birkaç Pa ile birkaç 100 Pa (düşük vakum aralığı) arasında artırmak için tasarlanmıştır(Danilatos, Rattenberger, and Dracopoulos 2011; Burnstock and Jones 2000; Toth, Thiel, and Donald 2003).

Bir DV-SEM'de, gelen elektronlarla veya numuneden yayılan elektronlarla çarpışma yoluyla numune odasındaki artık gaz moleküllerinden üretilen katyonlar kullanılarak, numune yüzeyinin elektriksel olarak negatif yüklenmesi nötralize edilebilir. Yani Düşük Vakum taramalı elektron mikroskobunda numune şarjının ortadan kaldırılması, numune odasına bir gaz, su, nitrojen veya hava sokulmasıyla gerçekleştirilir. Bölmedeki gaz, gelen elektronların ortalama serbest yolunu artırır. Gaz halindeki atomlar iyonlaşarak katyonlar oluşturacak ve bu da negatif yüklü numune yüzeyini nötralize edecektir. Gaz ayrıca yükü azaltmak için yayılan elektronların bir kısmını 'emebilir'. Bu fenomen, iletken olmayan bir numunenin iletken kaplama olmadan gözlemlenmesini sağlarken, şarjın etkisinden kaçınır. Sıradan bir SEM'de, iletken olmayan numuneleri kaplamasız gözlemlemek için hızlandırma voltajının yaklaşık 1 kV'a düşürülmesi gerekir. Ancak DV-SEM'de, iletken olmayan numuneleri gözlemlemek için hızlandırma voltajını düşürmek gerekli değildir. Buna ek olarak, DV-SEM çok fazla gaz çıkışı olan bir numuneyi gözlemlemek için de etkilidir.



Şekil 1.10 Peptid ile muamele edilmiş *S. aureus* ve *P. aeruginosa*'nın düşük vakumlu taramalı elektron mikroskobu (SEM) mikrografileri (Ko et al. 2017).

DV SEM'in, beklenmedik bir şekilde, düşük vakumda, genellikle 100 Pa'dan daha az çalışmasına rağmen ciddi ışın kayıplarının olduğu bulunmuştur. Bunun nedeni, elektron demetinin numuneye ulaşmadan önce gazlı bir ortamda nispeten uzun bir mesafe kat etmesi olarak görülmüştür. Toplam gaz kalınlığı önemlidir ve elektron kayıpları, yöneten denklemin üstel terimi nedeniyle şiddetlidir. Bu çalışmada, bazı ESEM ve DVSEM cihazlarının yaklaşık 5 kV hızlandırma voltajı ve yüksek basınç altında tatmin edici bir şekilde çalışamadığı veya hiç çalışmadığı gösterilirken, ışındaki büyük elektron kayıplarını telafi etmek için nispeten yüksek ışın akımı gereklidir. Sonuç olarak, çözünürlük ve cihazın kullanılabilirliği, büyük prob 'spot boyutu', artan arka plan gürültüsü ve numune radyasyon hasarı nedeniyle kısıtlanır. Bu yapay sınırlamalar, diferansiyel basınç aşamasının uygun şekilde yeniden tasarlanmasıyla aşılabilir ve bu da düşük büyütmelerde görüş alanını sınırlayan uygun elektron optiklerinin entegrasyonunu gerektirebilir. (Danilatos, Rattenberger, and Dracopoulos 2011)

Düşük vakumlu SEM'in bir teknik olarak dezavantajı, hazne basıncı ile görüntü çözünürlüğü arasındaki dengedir. Bir numuneyi ve hazneyi düşük vakumda tutmak ve gaz moleküllerinin kontrollü bir atmosferini korumak, birincil elektron ışınının bir dereceye kadar saçılmasına neden olacaktır. Ek olarak, numuneden uyarılan elektronlar da dedektöre ulaşmadan önce gaz molekülleri tarafından saçılabilir. Bu nedenle sinyal-gürültü oranı nispeten zayıf olabilir. Ek olarak, sinyal saçılmasının bir sonucu olarak, genellikle yalnızca sinyalin geri saçılmış elektron bileşenini tespit etmek mümkündür. Düşük enerjili ikincil elektronlar, gaz molekülleri arasında geleneksel bir ikincil elektron dedektörüne giden bir yol oluşturmak için yeterli enerjiye sahip değildir. Ancak avantajları çoktur ve kapsamlıdır. Hassas, değerli veya yeri doldurulamaz numuneler düşük vakumlu SEM'de güvenle görüntülenebilir. Hazırlık ve kaplama gereksizdir. Yağlı boya pulları, iletken olmayan pigmentler ve seramikler, SEM'in sunduğu geniş alan derinliği avantajıyla incelenebilir(Burnstock and Jones 2000).

1.5. Yüksek Çözünürlüklü SEM (HRSEM)

Yüksek çözünürlüklü SEM görüntüleme, bir numunenin ince ölçekli uzamsal özelliklerini ayırt etme kapasitesini ifade eder. Bu özellikler, bir matrise gömülü serbest duran nesneler veya yapılar olabilir. "İnce ölçekli" tanımı, en uç durumlarda nanometre altı özellikleri içerebilen uygulamaya bağlıdır. Uzamsal çözünürlük sınırını belirleyen en önemli faktör, olay ışınının numuneye girerken ki ayak izidir. Elektron optiğinin performans seviyesine bağlı olarak, sınırlayıcı ışın çapı 1 nm kadar küçük veya daha ince olabilir. Ancak, nihai çözünürlük performansının ışın ayak izinden önemli ölçüde daha zayıf olması muhtemeldir ve birkaç ek faktörden bir veya daha fazlası tarafından belirlenecektir:

- Işın elektronu–numune etkileşimlerinin fiziği nedeniyle ikincil elektronlardan ve/veya geri saçılmış elektronlardan oluşan görüntüleme sinyalinin yer değiştirmesi;
- Eşik Denklemini karşılamak için gereken ışın boyutuna uygulanan kısıtlamalar; ilgi duyulan özellikler tarafından üretilen kontrast için görünürlüğü belirlemek;
- SEM'in mekanik kararlılığı;
- Numune montajının mekanik kararlılığı;
- Numunenin kirlenmesini önlemek için gerekli vakum ortamı ve numune temizliği;
- Radyasyon hasarı nedeniyle numunenin bozulması ve;
- SEM ortamındaki başıboş elektromanyetik alanlar.

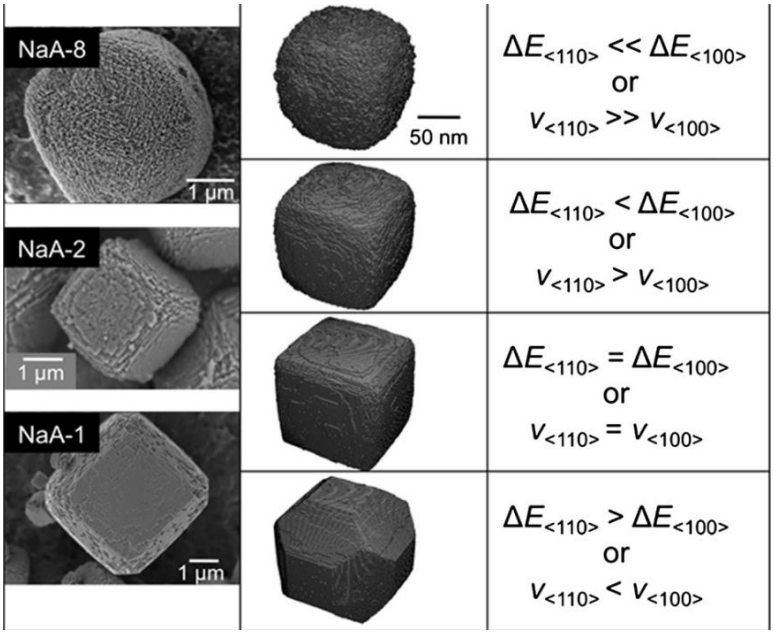
Bu faktörleri tanımak ve etkilerini en aza indirmek veya ortadan kaldırmak, optimum yüksek çözünürlüklü görüntüleme performansına ulaşmak için kritik öneme sahiptir. Tatmin edici yüksek çözünürlüklü SEM elde etmek genellikle cihazın performans sınırında ve teknikte çalışmayı içerdiğinden, deneyim bir numune türünden diğerine değişebilir ve farklı sınırlayıcı faktörler farklı durumlarda kendini gösterebilir.

Yüksek çözünürlüklü SEM, cihazın mümkün olduğunca fazla akım taşıyan, çapı 1 nm veya daha az olan, ince odaklanmış, astigmatik bir ışın üretmesini gerektirir. Yüksek çözünürlüklü çalışmalar için en uygun elektron kaynakları, soğuk alan emisyonu ve yüksek kararlılık üreten Schottky termal destekli alan emisyonudur. Soğuk alan emisyonu kullanılabilir kaynaklar arasında en yüksek parlaklığı üreten (örneğin, E0=20 keV'de ~109 A/(cm^2sr^{-1})) ancak saniyelerden dakikalara kadar bir zaman sabitiyle emisyon akımı kararsızlığından muzdariptir. Schottky termal destekli alan emisyonu hem kısa vadede (saniyelerden dakikalara) hem de uzun vadede (saatlerden günlere) yüksek parlaklık (örneğin, E0=20 keV'de ~108 A/(cm^2sr^{-1})) sağlamaktadır.(Meredith 1961)

Yüksek çözünürlüklü taramalı elektron mikroskobu (HRSEM), biyolojik yapıların üç boyutlu organizasyonu, makromoleküler kompleksler ve hücresel bileşenlerin ve izole edilmiş hücre organellerinin etkileşimleri hakkında yeni bilgiler edinmek için giderek daha fazla kullanılmaktadır. Modern taramalı elektron mikroskopları (SEM'ler) yeterli numune hazırlama ile birleştirildiğinde artık biyolojik materyal için 2-5 nm'ye kadar transmisyon elektron mikroskopları (TEM'ler) kullanılarak elde edilenle karşılaştırılabilir çözünürlük sağlayabilir. Cihazın çok

yönlülüğü ve yeni numune hazırlama teknikleri, TEM ile mümkün olmayan kromozomların, sitoskeletal bileşenlerin, virüsün ve diğer biyolojik materyallerin ayrıntılı analizine olanak sağlamıştır (Schatten 2011).

LTA zeolit kristalizasyonu sırasında organosilan yüzey aktif maddesi tarafından mezogözenek oluşumu, yüksek çözünürlüklü SEM ve Monte Carlo simülasyonu isimli çalışmada oldukça verimli sonuçlar HRSEM ile alınabilmiştir. Şekil 4.1 de' yapılan çalışmanın bir kısmına aiT görüntüler yer almaktadır.



Şekil 1.11 NaA-1, -2 ve -8'in HRSEM görüntüleri ve <100> ve <110> boyunca bağıl hız artışı ile kaba taneli simülasyon yoluyla morfolojik tanımlama.(Cho et al. 2011)

KAYNAKLAR

Altan, Tolga, Sezer Onbilgin, Cigdem Timurkutluk, and Bora Timurkutluk. 2024. "Effects of Tape Thickness on the Fabrication and Performance of Microtubular Solid Oxide Fuel Cells Manufactured by Tape Casting." *International Journal of Hydrogen Energy* 59 (January): 903–12. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.02.071.

Bai, Huanhuan, Nicolas J. Briot, Matthew J. Beck, and T. John Balk. 2024. "Crystallographic Faceting of Bulk Tungsten Surfaces Observed during in Situ Heating in an Environmental Scanning Electron Microscope." *Materials Characterization* 212 (October 2023): 113925. https://doi.org/10.1016/j.matchar.2024.113925.

Bogner, A., P. H. Jouneau, G. Thollet, D. Basset, and C. Gauthier. 2007. "A History of Scanning Electron Microscopy Developments: Towards 'Wet-STEM' Imaging." *Micron* 38 (4): 390–401. https://doi.org/10.1016/j.micron.2006.06.008.

Burnstock, Aviva, and Chris Jones. 2000. "Scanning Electron Microscopy Techniques for Imaging Materials from Paintings." *Radiation in Art and Archeometry*, 202–31. https://doi.org/10.1016/B978-044450487-6/50056-0.

Cho, Kanghee, Ryong Ryoo, Shunsuke Asahina, Changhong Xiao, Miia Klingstedt, Ayako Umemura, Michael W. Anderson, and Osamu Terasaki. 2011. "Mesopore Generation by Organosilane Surfactant during LTA Zeolite Crystallization, Investigated by High-Resolution SEM and Monte Carlo Simulation." *Solid State Sciences* 13 (4): 750–56. https://doi.org/10.1016/j.solidstatesciences.2010.04.022.

Danilatos, G., J. Rattenberger, and V. Dracopoulos. 2011. "Beam Transfer Characteristics of a Commercial Environmental SEM and a Low Vacuum SEM." *Journal of Microscopy* 242 (2): 166–80. https://doi.org/10.1111/j.1365-2818.2010.03455.x.

Erlandsen, S. L., C. Frethem, and Y. Chen. 2000. "Field Emission Scanning Electron Microscopy (FESEM) Entering the 21st Century: Nanometer Resolution and Molecular Topography of Cell Structure." *Journal of Histotechnology* 23 (3): 249–59. https://doi.org/10.1179/his.2000.23.3.249.

Fu, Haiyang, Bo Gao, Chenglong Hu, Zhuang Liu, Liang Hu, Jiawen Kan, Zhongbao Feng, and Pengfei Xing. 2022. "3D Nitrogen-Doped Graphene Created by the Secondary Intercalation of Ethanol with Enhanced Specific Capacity." *Nanotechnology* 33 (7). https://doi.org/10.1088/1361-6528/ac30c2.

Hashimoto, Yoichiro, Shuichi Takeuchi, Takeshi Sunaoshi, and Yu Yamazawa. 2020. "Voltage Contrast Imaging with Energy Filtered Signal in a Field-Emission Scanning Electron Microscope." *Ultramicroscopy* 209 (April 2019): 112889. https://doi.org/10.1016/j.ultramic.2019.112889.

Hayes, William Ignatius, Paul Joseph, Muhammad Zeeshan Mughal, and Pagona Papakonstantinou. 2015. “Production of Reduced Graphene Oxide via Hydrothermal Reduction in an Aqueous Sulphuric Acid Suspension and Its Electrochemical Behaviour.” *Journal of Solid State Electrochemistry* 19 (2): 361–80. https://doi.org/10.1007/s10008-014-2560-6.

Jang, H. S., S. O. Kang, S. H. Nahm, Y. I. Kim, B. G. Min, D. H. Kim, and H. R. Lee. 2006. “Field Emission Characteristics of an Individual Carbon Nanotube inside a Field Emission-Scanning Electron Microscope.” *Vacuum* 81 (4): 422–26. https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2006.06.009.

Ko, Su Jin, Min Kyung Kim, Jeong Kyu Bang, Chang Ho Seo, Tudor Luchian, and Yoonkyung Park. 2017. “Macropis Fulvipes Venom Component Macropin Exerts Its Antibacterial and Anti-Biofilm Properties by Damaging the Plasma Membranes of Drug Resistant Bacteria.” *Scientific Reports* 7 (1): 1–14. https://doi.org/10.1038/s41598-017-16784-6.

Meredith, W. J. 1961. *X-Ray Microscopy and x-Ray Microanalysis*. *International Journal of Radiation Biology*. Vol. 3. https://doi.org/10.1080/09553006114550601.

Pawley, James. 1997. “The Development of Field-Emission Scanning Electron Microscopy for Imaging Biological Surfaces.” *Scanning* 19 (5): 324–36.

Schatten, Heide. 2011. “Low Voltage High-Resolution SEM (LVHRSEM) for Biological Structural and Molecular Analysis.” *Micron* 42 (2): 175–85. https://doi.org/10.1016/j.micron.2010.08.008.

Senthil Prabhu, R, R Priyanka, M Vijay, and G R Kaviya Vikashini. 2021. “Field Emission Scanning Electron Microscopy (Fesem) with A Very Big Future in Pharmaceutical Research.” *Research Article | Pharmaceutical Sciences | OA Journal | MCI Approved | Index Copernicus* 11 (2): 2321–3272. www.ijpbs.comorwww.ijpbsonline.com.

Toth, M., B. L. Thiel, and A. M. Donald. 2003. “Interpretation of Secondary Electron Images Obtained Using a Low Vacuum SEM.” *Ultramicroscopy* 94 (2): 71–87. https://doi.org/10.1016/S0304-3991(02)00203-6.

Tutas, Gulsah Germen, Cigdem Timurkutluk, Sezer Onbilgin, and Bora Timurkutluk. 2025. “Recovery of Waste Anode Materials in Solid Oxide Fuel Cells.” *Resources, Conservation and Recycling* 212 (May 2024): 107997. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107997.

Wan, Di, Yan Ma, Binhan Sun, Nima Razavi, Dong Wang, Xu Lu, and Wenwen Song. 2021. “Evaluation of Hydrogen Effect on the Fatigue Crack Growth Behavior of Medium-Mn Steels via in-Situ Hydrogen Plasma Charging in an Environmental Scanning Electron Microscope.” *Journal of Materials Science and Technology* 85:30–43. https://doi.org/10.1016/j.jmst.2020.12.069.

Zhou, Weilie, Robert Apkarian, Zhong Lin Wang, and David Joy. 2007. "Fundamentals of Scanning Electron Microscopy (SEM)." *Scanning Microscopy for Nanotechnology: Techniques and Applications*, 1–40. https://doi.org/10.1007/978-0-387-39620-0_1.

G.D. Danilatos, Adv. Electron. Electron Phys. 71 (1988) 10

https://www.thermofisher.com/tr/en/home/materials-science/esem.html

https://www.mpi-bremen.de/en/Environmental-scanning-electron-microscope.html



Tarım Topraklarındaki Emisyonların Azaltılması ve Toprak Yönetimi

***Binnaz Zeynep Zaimoğlu*[1]**

[1] Prof. Dr., Çukurova Üniversitesi, 0000-0002-9573-4781

1. Giriş

Toprak, hem sera gazı salımına neden olan bir faktör hem de bu salımların azaltılmasında önemli bir kaynak olarak kabul edilebilir. Tarım ve orman alanlarının yapılaşması, tarımsal faaliyetlerin artışı ve arazi kullanımındaki değişiklikler, doğrudan sera gazı salımlarını artıran faktörlerdir. Özellikle ormansızlaşma, tarım arazilerinin açılması, tarımda kullanılan kimyasal gübreler ve toprağın aşırı işlenmesi, toprakların karbon depolama kapasitesini azaltır ve atmosferdeki karbondioksit seviyelerinin yükselmesine neden olur (Batjes, 1996).

Bununla birlikte, toprak, okyanuslardan sonra en büyük karbon deposu olarak büyük bir potansiyele sahiptir. Toprak, organik maddeler aracılığıyla büyük miktarlarda karbonu depolayabilen bir yapıdadır. Yıllar boyunca, bitki örtüsünden ve organik maddeden gelen karbon toprağa geçer ve toprakta hapsolur. Ancak bu karbon depolama kapasitesinin artması, doğru toprak yönetim teknikleri ve tarım uygulamalarıyla mümkündür. Houghton (1999) tarafından yapılan araştırmalar, toprakların atmosferdeki karbonu bağlama ve sera gazı emisyonlarını azaltma potansiyelinin çok yüksek olduğunu göstermektedir. Toprakta karbon depolamak, atmosferdeki karbondioksit seviyelerini azaltmaya yardımcı olabilir ve iklim değişikliğiyle mücadelede önemli bir rol oynar (Baran ve ark, 2023).

Bu bağlamda, tarımda ve orman yönetiminde yapılan doğru uygulamalar, toprağın karbon tutma kapasitesini artırabilir. Bu yöntemler arasında koruyucu tarım, organik gübre kullanımı, ağaçlandırma ve agroforestry gibi yaklaşımlar yer almaktadır. Ayrıca, toprak erozyonunun önlenmesi, toprak işleme yöntemlerinin minimize edilmesi ve biyolojik çeşitliliğin artırılması gibi faktörler, toprağın karbon depolama kapasitesinin korunmasına ve artırılmasına yardımcı olabilir.

Sonuç olarak, toprak, iklim değişikliğiyle mücadelede hem kaynak hem de çözüm sunan bir unsurdur. Doğru toprak yönetimi ve tarım teknikleri ile toprak, atmosferdeki karbonu bağlayarak sera gazı salımlarını önemli ölçüde azaltabilir. Bu nedenle, toprakların verimli kullanımı ve sağlığının korunması, küresel emisyonları azaltma stratejilerinin önemli bir parçası olmalıdır.

1.2 Tarımsal Sera Gazı Salınımı

Birleşmiş Milletler Hükümetlerarası İklim Konferansı 2007 raporuna göre, tarım sektörü, insan faaliyetlerinin küresel ısınmaya katkısının %14'ünü oluşturmaktadır. Tarımsal faaliyetler sırasında sera gazı salınımına neden olan başlıca kaynaklar arasında hayvancılık, gübre kullanımı ve tarımsal atıkların yakılması yer almaktadır. Tarım kaynaklı sera gazı emisyonlarının dağılımı, enterik fermantasyonun %47 ile en önemli emisyon kaynağı olduğunu göstermektedir.

1.3 Toprak Emisyonları ve Nedenleri

Topraklar, atmosferdeki karbonun önemli bir kısmını depolamakta ve bu depolama, iklim değişikliği ile mücadelede kritik bir rol oynamaktadır. Toprak organik karbonunun miktarındaki küçük değişiklikler, atmosferdeki CO2 konsantrasyonunu önemli ölçüde etkileyebilir. Gübre kullanımı, hayvancılık ve tarımsal atıkların yönetimi, toprak emisyonlarının başlıca kaynaklarıdır.

1.4 Gübre Kullanımı ve Emisyonlar

Hayvancılık sektöründe sera gazı salınımları, hayvanların geviş getirmesi ve gübre yönetimi yoluyla oluşmaktadır. Metan gazı, hayvansal gübrelerin oksijensiz ortamda parçalanması sonucu ortaya çıkmaktadır. Gübre uygulamaları, azotun toprakta daha etkili bir şekilde kullanılmasını sağlayarak N2O emisyonlarını azaltabilir.

Gübre kullanımı, özellikle azotlu gübrelerin toprağa uygulanması, çeşitli kimyasal süreçler aracılığıyla sera gazı emisyonlarının artmasına neden olabilir. Azotlu gübrelerin yanlış ya da aşırı kullanımı, toprağın nitrojen döngüsünü bozarak **azot oksit (N_2O)** gibi güçlü sera gazlarının salınımını artırır. Azot oksit, karbon dioksitten yaklaşık 300 kat daha fazla ısınma potansiyeline sahip bir gazdır. Gübre kullanımının emisyonları nasıl artırdığına dair detaylı bir açıklama şu şekildedir:

1.4.1 Azot Oksit (N_2O) Üretimi

Azot oksit, azotlu gübrelerin toprakta uygulandıktan sonra bir dizi mikrobiyolojik süreçle üretilir. Bu süreçler, özellikle **nitrifikasyon** ve **denitrifikasyon** olarak adlandırılan iki mikrobiyolojik reaksiyonla gerçekleşir:

- **Nitrifikasyon**: Azotlu gübreler toprağa uygulandığında, amonyum (NH_4^+) iyonları topraktaki bakteriler tarafından nitrat (NO_3^-) formuna dönüştürülür. Bu süreç, azot oksit salınımını artıran ilk adımdır. Nitrifikasyon sırasında, özellikle azotlu gübrelerin fazla kullanılması, ortamda yüksek miktarda amonyum ve nitrat birikmesine neden olur, bu da denitrifikasyon sürecini tetikler.
- **Denitrifikasyon**: Denitrifikasyon, toprakta azot oksit gazları (N_2O ve N_2) üreten anaerobik bir bakteriyel süreçtir. Bu süreç, özellikle suyla doygun topraklarda ve düşük oksijen seviyelerinin bulunduğu ortamlarda daha fazla gerçekleşir. Azotlu gübrelerin fazla uygulanması, toprakta fazla miktarda nitrat birikmesine yol açarak, bu nitratların

bakteriler tarafından denitrifikasyon reaksiyonuna girmesine neden olur. Bu reaksiyon sonucunda, azot oksit (N_2O) salınır.

1.4.2 Fazla Azotlu Gübre Uygulaması

Fazla azotlu gübre kullanımı, doğrudan azot oksit emisyonlarının artmasına yol açar. Tarımsal üretimde gereğinden fazla gübre kullanıldığında, bu fazla azot toprakta çözünerek suya karışır ya da atmosfere gaz haline dönüşerek salınır. Bu durum, özellikle azot oksit salınımını artırır çünkü toprak, aşırı azot alımını işlemek için mikroorganizma aktivitelerini artırır. Mikroorganizmalar fazla azotu denitrifikasyon reaksiyonu yoluyla azot oksite dönüştürürler.

1.4.3 Toprak Tipi ve Koşulları

Toprağın fiziksel ve kimyasal özellikleri, gübrelerin emisyonlara yol açma potansiyelini etkiler. Örneğin, nemli, sıkışmış ve oksijensiz topraklarda (örneğin, sulama yapılan alanlarda) denitrifikasyon süreçleri daha yoğun olur ve dolayısıyla daha fazla azot oksit salınımı gerçekleşir. Ayrıca, asidik topraklar da bu süreçlerin daha hızlı olmasına yol açabilir. Toprak türü ve pH seviyesi, azotlu gübrelerin dönüşüm hızını ve dolayısıyla emisyonları etkileyebilir.

1.4.4 Yanlış Zamanlama ve Yöntemler

Gübrelerin zamanlaması ve uygulanma yöntemi de emisyonları artırabilir. Azotlu gübreler, bitkiler tarafından en verimli şekilde büyüme dönemlerinde alınır. Ancak gübreler erken veya geç uygulanırsa, bitkilerin ihtiyaç duyduğu zamanlarda toprakta yeterli azot bulunmaz ve fazla azot, denitrifikasyon süreciyle azot oksite dönüşebilir Atav, V. (2024).. Ayrıca, gübrelerin yüzeyde yayılması yerine toprağa daha derinlemesine verilmesi veya sıvı gübrelerin etkili bir şekilde uygulanması gibi uygun teknikler kullanıldığında emisyonlar azaltılabilir.

1.4.5 Sıvı ve Katı Gübrelerin Farklı Etkileri

Sıvı ve katı gübrelerin toprak üzerindeki etkileri farklıdır. Sıvı gübreler, toprak yüzeyinde daha uzun süre kalır ve hızlı bir şekilde emilmez. Bu durum, azotlu gübrelerin denitrifikasyon yoluyla azot oksit üretmesine zemin hazırlayabilir. Katı gübreler ise toprağa karışarak daha homojen bir şekilde dağılır, bu da gübrelerin daha verimli kullanılmasını sağlar. Sıvı gübrelerin yanlış kullanımı ise, daha fazla emisyon kaynağına yol açar.

1.4.6 Erozyon ve Yüzey Kirliliği

Fazla gübre kullanımı, toprak erozyonuna yol açabilir. Erozyon, toprağın verimli üst katmanlarını kaybetmesine ve gübrelerin su kaynaklarına karışmasına neden olur. Bu durumda, azotlu gübreler su yolları boyunca taşınarak çevresel

kirliliğe neden olabilir ve özellikle su yoluyla azot oksit emisyonları artabilir. Gübrelerin suya karışması da denitrifikasyonun daha fazla gerçekleşmesine zemin hazırlar.

1.4.7 Emisyonların Azaltılması İçin Çözüm Yöntemleri

- **Azotlu Gübrelerin Verimli Kullanımı**: Azotlu gübrelerin doğru zamanda, doğru miktarda ve doğru şekilde uygulanması emisyonları azaltabilir. Tarımsal danışmanlık ve akıllı tarım teknolojileri (örneğin, toprak testleri ve gübre uygulama sistemleri) bu konuda yardımcı olabilir.
- **Yavaş Salınımlı ve Organik Gübrelerin Kullanımı**: Yavaş salınımlı gübreler, bitkilerin azot ihtiyacını daha uzun süre karşılar ve gübrelerin daha verimli kullanılmasını sağlar. Organik gübreler de toprak sağlığını iyileştirerek azot oksit salınımlarını azaltabilir.
- **Sulama Yönetimi**: Sulama yöntemlerinin optimize edilmesi, toprakta su birikintilerini önleyerek denitrifikasyon oranlarını azaltabilir. Bu, özellikle sulama yapılan alanlarda azot oksit emisyonlarını azaltmak için önemlidir (Islam, ve ark., 2022). Mitigating greenhouse gas emissions from irrigated rice cultivation through improved fertilizer and water management. Journal of Environmental Management, 307, 114520.
- **Erozyon Kontrolü**: Toprak erozyonunu önlemek, gübre kayıplarını ve su kirliliğini azaltarak dolaylı yoldan emisyonları azaltabilir. Tarımda koruyucu toprak işleme yöntemleri ve bitki örtüsü koruma uygulamaları bu amaca hizmet eder.

1.5 Toprak Yönetimi

Toprak yönetimi, toprakların verimli, sürdürülebilir ve çevre dostu bir şekilde kullanılması için yapılan bir dizi uygulama, strateji ve teknikleri içerir. Bu yönetim, toprak sağlığını koruyarak, ekosistem hizmetlerini sürdürür ve tarımsal verimliliği artırır. Aynı zamanda, toprak emisyonlarının azaltılması ve iklim değişikliği ile mücadele için kritik bir rol oynar. Toprak yönetimi, toprakların yalnızca tarımsal üretim için değil, aynı zamanda suyun arıtılması, karbon depolanması, biyolojik çeşitliliğin korunması gibi ekosistem hizmetlerini sağlamak amacıyla da düzenlenmesi gereken bir alanı kapsar.

Toprak yönetiminin temel amacı, toprakları daha verimli hale getirirken, doğaya zarar vermemek ve sürdürülebilir kullanımını sağlamaktır. Sürdürülebilir

toprak yönetimi, toprak erozyonunu, verimlilik kaybını ve emisyonları azaltarak toprak sağlığını korur. Ayrıca, sera gazı salımlarını azaltmaya yönelik stratejilerle toprağın karbon depolama kapasitesini artırır.

1.5.1 Toprak Sağlığının Önemi

Toprak sağlığı, toprak organik maddesinin varlığı, su tutma kapasitesi, mikroorganizmaların çeşitliliği ve toprak yapısının korunması gibi faktörlere dayanır. Sağlıklı topraklar, bitki büyümesini destekler, suyun toprakta tutulmasını sağlar, besin maddelerini depolar ve sera gazlarını emerek atmosferdeki karbondioksiti depolar.

Sağlıklı topraklar, aynı zamanda ekosistem hizmetleri sunar. Örneğin, toprakların suyu filtrelemesi, doğal gübreleri üretmesi ve karbonu depolaması gibi görevleri vardır. Ancak, toprak sağlığı, yanlış yönetim ve aşırı kullanımla kolayca bozulabilir. Tarımda aşırı gübre kullanımı, yoğun toprak işleme, ormansızlaşma ve aşırı otlatma gibi uygulamalar toprak sağlığını tehdit eder.

1.5.2 Toprak Yönetimi Yöntemleri

Sürdürülebilir toprak yönetimi, toprağın fiziksel, kimyasal ve biyolojik özelliklerini iyileştiren çeşitli stratejileri içerir. Bu yöntemler, toprak erozyonunun önlenmesi, suyun **verimli** kullanımı ve sera gazı emisyonlarının azaltılması gibi çevresel etkilerin en aza indirilmesini hedefler. İşte bazı temel toprak yönetimi yöntemleri:

a. Koruyucu Tarım (Conservation Agriculture)

Koruyucu tarım, toprak işleme ve toprak üzerindeki bitki örtüsünü azaltarak toprağın verimliliğini koruyan bir yaklaşımdır. Bu yöntemler, toprağın organik madde içeriğini artırır, suyun daha verimli kullanılmasını sağlar ve toprak erozyonunu engeller. Koruyucu tarımda uygulanan başlıca teknikler şunlardır:

- Azaltılmış Toprak İşleme: Toprağı aşırı işlemek, organik maddeyi yok eder ve toprak yapısını bozar. Azaltılmış toprak işleme, bu zararı engeller ve toprağın doğal yapısının korunmasını sağlar.
- Çiftlik Kapatıcıları ve Döner Tarım: Çiftlik kapatıcıları, toprak yüzeyinde organik maddeyi koruyarak, su buharlaşmasını azaltır ve toprak erozyonunu engeller.
- Sürekli Ekim: Her yıl farklı bitkiler ekmek, toprak sağlığını korur ve monokültür uygulamalarının zararlı etkilerini önler.

b. Organik Tarım

Organik tarım, kimyasal gübre ve pestisit kullanımını en aza indirerek, doğal gübreler ve biyolojik mücadele yöntemleriyle tarım yapılmasını teşvik eder. Bu yöntemle toprağın organik madde içeriği artar, bu da toprak sağlığını iyileştirir ve su tutma kapasitesini artırır. Ayrıca, organik tarım, toprakta karbon depolama potansiyelini artırarak, sera gazı emisyonlarını azaltabilir.

c. Agroforestry (Tarım-Orman Sistemleri)

Agroforestry, tarım alanlarıyla ormanların birleştiği bir yönetim yöntemidir. Tarım ürünleri ve ağaçların birlikte yetiştirilmesi, toprak verimliliğini artırabilir ve toprak karbon depolama kapasitesini yükseltebilir. Ağaçlar, toprak erozyonunu önler, suyun toprakta tutulmasını sağlar ve ekosistemi destekler. Ayrıca, ormanlar karbon emilimi sağlar ve atmosferdeki karbondioksiti depolar.

d. Toprak Erozyonu Kontrolü

Toprak erozyonu, rüzgar ve suyun etkisiyle toprağın yüzeyinden taşınmasıdır. Erozyon, toprağın verimli katmanlarının kaybına ve dolayısıyla tarımsal üretimin azalmasına yol açar. Erozyonu önlemek için şu stratejiler kullanılabilir:

- **Teraslama ve Konturlama:** Eğimli arazilerde toprak kaymalarını önlemek için kullanılan yöntemlerdir.
- **Bitki Örtüsü ve Malçlama:** Toprak yüzeyinde bitki örtüsü oluşturarak rüzgar ve suyun toprak üzerindeki etkisini azaltmak mümkündür.

e. Toprak Kirliliği ve Asidifikasyonu Kontrolü

Toprak kirliliği, kimyasal gübreler, pestisitler ve ağır metaller gibi zararlı maddelerin toprakta birikmesiyle oluşur. Toprak asidifikasyonu ise toprak pH'ının düşmesiyle gerçekleşir. Bu süreçler, toprak sağlığını olumsuz etkiler ve tarım verimliliğini azaltır. Bu nedenle, sürdürülebilir toprak yönetimi, kimyasal kullanımını minimize etmek ve toprağın pH seviyesini dengede tutmak amacıyla organik gübreler ve biyolojik uygulamalar kullanmalıdır.

3. Toprak Yönetiminin İklim Değişikliği ile İlişkisi

Toprak yönetimi, iklim değişikliğiyle mücadelede önemli bir rol oynar. Topraklar, karbonu depolayabilen en büyük doğal kaynaklardan biridir. Sürdürülebilir toprak yönetimi teknikleri, toprağın karbon tutma kapasitesini artırarak, atmosferdeki karbondioksit seviyelerini azaltabilir. Bu, sera gazı emisyonlarını sınırlamak için kritik bir stratejidir.

- **Karbon Depolama:** Toprak, organik maddeler aracılığıyla büyük miktarlarda karbonu depolayabilir. Sağlıklı ve verimli topraklar, karbonu uzun süre tutarak iklim değişikliğine karşı bir tampon görevi görür.
- **Toprakta Su Tutma Kapasitesinin Artırılması:** Sağlıklı topraklar, suyu daha verimli tutar. Bu, kuraklık ve sel gibi iklim değişikliğiyle ilgili olaylara karşı tarımın daha dayanıklı hale gelmesini sağlar.
- **Toprak Erozyonunun Azaltılması:** Erozyon, toprağın karbon depolama kapasitesini azaltır. Bu nedenle, erozyonu engelleyen toprak yönetimi uygulamaları, hem toprak sağlığını korur hem de karbon salımını engeller.

1.6 İklim Değişikliği ile Mücadelede Toprak Yönetiminin Rolü

İklim değişikliği ile mücadelede toprak yönetiminin rolü, yalnızca emisyonları azaltmakla kalmayıp, aynı zamanda tarımsal üretkenliği artırmak ve gıda güvenliğini sağlamak açısından da önemlidir. Tarımda sürdürülebilir uygulamaların benimsenmesi, çiftçilerin iklim değişikliği ile başa çıkmalarına yardımcı olurken, aynı zamanda doğal kaynakların korunmasına da katkı sağlar (Fageria, ve Baligar, V. (2005).

1.7 Tarım Kaynaklı Sera Gazı Emisyonları

Toprak, iklim sisteminde önemli ve genellikle ihmal edilen bir unsurdur. Okyanuslardan sonra ikinci en büyük karbon deposu ya da "yutağıdır". Bölgeye bağlı olarak, iklim değişikliği bitki büyümesinden dolayı daha fazla karbonun bitkilerde ve toprakta depolanmasına veya daha fazla karbonun atmosfere salınmasına neden olabilir. Toprak üzerindeki kilit ekosistemlerin yeniden iyileştirilmesi ve kentsel ve kırsal alanlarda toprağın sürdürülebilir bir şekilde kullanılması, iklim değişikliğini hafifletmemize ve uyum sağlamamıza yardımcı olabilir.

İklim değişikliği genellikle sadece atmosferde meydana gelen bir durummuş gibi görünür. Neticede, bitkiler fotosentez yaptıklarında atmosferdeki karbonu çekerler. Ancak, atmosferdeki karbon da toprağı etkiler, çünkü yerüstü bitki büyümesi için kullanılmayan karbon bir bitkinin kökleri boyunca dağılır ve böylece karbonu toprakta bırakır. Toprağın bozulmaması durumunda, bu karbon stabil hale gelebilir ve binlerce yıl gömülü kalabilir. Sağlıklı topraklar bu şekilde iklim değişikliğini hafifletebilir.

Karbon depolaması söz konusu olduğunda tüm topraklar aynı değildir. Karbon açısından en zengin topraklar genellikle kuzey Avrupa'da, Birleşik Krallık'ta ve İrlanda'da bulunan turbalıklardır. Otlak toprakları da hektar başına fazla oranda karbon depolar. Buna karşın, güney Avrupa'daki sıcak ve kuru bölgelerdeki toprak daha az karbon içerirler.

Avrupa'nın bazı kısımlarında, yüksek sıcaklıklar daha fazla bitkinin büyümesine ve toprakta daha fazla karbonun depolanmasına yol açabilir. Ancak, yüksek sıcaklıklar topraktaki organik maddelerin ayrışmasını ve mineralizasyonunu da artırarak organik karbon içeriğini azaltabiliren.

Diğer bölgelerde, stabil turbalıklardaki karbon içeren organik maddenin sudaki düşük oksijen seviyesi nedeniyle ayrışması engellenir. Bu tür bölgeler kuruduğunda, organik madde hızla ayrışarak atmosfere karbondioksit (CO2) salar.

Toprağın rutubet miktarının, sıcaklıkların yükselmesi ve yağış düzenlerindeki değişikliklerden etkilendiğine dair işaretler vardır. Geleceğe dair yapılan tahminlere göre, bu durum 2021 ile 2050 yılları arasında Avrupa'nın büyük kısmında yaz aylarındaki toprak rutubetindeki genel değişiklikle birlikteen, Akdeniz bölgesinde kayda değer düşüşleri ve Avrupa'nın kuzeydoğu kısmında bazı artışları da kapsayacak şekilde devam edebilir (Xu,ve ark 2012). Atmosferimizdeki karbondioksit konsantrasyonunun artışı, topraktaki mikropların organik maddeyi ayrıştırmak için daha hızlı çalışmasına neden olarak daha da fazla karbondioksit salaren. Topraktaki sera gazlarının salınmasının ve donmuş toprağın eritilmesinin, karbondioksitten çok daha kuvvetli bir sera gazı olan metan gazının özellikle kuzey Avrupa ve Rusya'da yüksek miktarda salınılmasına neden olacağı beklenmektedir (Van Grinsven ve ark (2013).

Farklı bölgelerin, sera gazlarını farklı seviyelerde yutması ve salması nedeniyle, genel etkinin nasıl olacağı henüz net değildir. Ancak, ısınan bir iklimin toprağın daha fazla sera gazı salmasına neden olabileceği ve bunun da kendi kendine güçlenen bir sarmal şeklinde iklimi ısıtabileceği konusunda belirgin bir risk vardır.

Atmosferdeki SG bileşiminin bozulması neticesinde, iklimde meydana gelen değişimler, en önemli küresel sorunlardan birisidir. IPCC 2007 Raporuna göre, iklim değişikliğine etki eden SGE'nda tarım sektörünün tek başına %14'lük bir payı bulunmaktadır (Dellal 2008). Bunun yanında gelişmekte olan ülkelerde, iklim değişikliğini azaltma potansiyelinin %70'ini tarım sektörünün oluşturması (FAO 2012/b), bu konuda önlemler alınması gerektiğini açıkça ortaya koymaktadır. İklim değişikliğine etki eden SG'larının başında, kar-

bondioksit, metan ve nitröz oksit gazları yer almaktadır. Tarım sektörünün doğrudan etki ettiği metan ve nitröz oksit ile dolaylı olarak salınımına sebep olduğu karbondioksit gazı, artan gıda talebini karşılamaya yönelik bilinçsizce yapılan faaliyetler neticesinde artış göstermiştir. Tarımsal faaliyetlerden kaynaklı karbon emisyonunun ana kaynağı, toprak işleme ve arazi kullanım değişimleridir. artırdığından en önemli ve önlem alınması gereken faaliyetleri kapsamaktadır. Bu faaliyetler ormanların, bataklıkların ve turbalıkların, tarım alanına veya meraya dönüştürülmesi ile yer üzerindeki biyokütlenin yok olmasına ya da bozulmasına yol açmaktadır. Tarımın ana kaynağı olan metan ve nitröz oksit gazları ise hem bitkisel hem de hayvansal üretimdeki yanlış uygulamalar neticesinde ortaya çıkmaktadır. Tarımda nitröz oksit emisyonunun en önemli kaynağı olan gübre kullanımı, tek başına tarımsal SGE'nun %37'sini, hayvancılık faaliyetlerinden kaynaklanan metan emisyonu ise toplam tarımsal SGE'nun %32'sini oluşturmaktadır. Bunların yanında, çeltik yetiştiriciliği de %11 oranındaki metan salınımı ile önlem alınması gereken tarımsal faaliyetler arasında yer almaktadır (FAO 2008). Sonuç olarak, dünyada artan nüfus ve büyüme oranları göz önüne alındığında, doğrudan doğal kaynakları kullanan tarım sektöründe, mücadele ve uyumla ilgili çalışmaların yapılması şarttır (Weber, 2018). Bu çalışmalar, özellikle tarımın ana gelir faaliyeti olduğu az gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde, tarım kaynaklı SGE'larının azalmasına ve aynı zamanda gıda güvenliğinin sağlanmasına katkı sağlayacaktır. Ancak uygulamaların çiftçiler tarafından benimsenmesi, onların faaliyetlerinde değişikliğe gidebilmeleri için gerekli olan güce ve imkâna sahip olmalarına bağlıdır. Tarım işletmelerinde yapılacak yeni yatırımlarda ilave gelire ihtiyaç duyulacağından, özellikle az gelişmiş ülkelerde devletlerin üreticilere destek vermesi ve finansal kaynak sağlaması gerekmektedir. Bunun yanında, çiftçilerin iklim değişikliği ile ilgili bilinç düzeylerini belirleyen ve tarımsal faaliyetlerden kaynaklı SGE'ları rasyonel bir şekilde

1.8 SONUÇ

Sonuç olarak, tarım topraklarındaki emisyonların azaltılması ve etkili toprak yönetimi, iklim değişikliği ile mücadelede hayati öneme sahiptir. Tarım sektöründe sera gazı emisyonlarının azaltılması için çiftçilerin bilinçlendirilmesi, desteklenmesi ve sürdürülebilir uygulamaların teşvik edilmesi gerekmektedir. Bu çabalar, hem çevresel sürdürülebilirliği sağlamakta hem de gıda güvenliğini artırmaktadır."

Tarımda toprak yönetiminin iyileştirilmesi, sadece verimlilik artışı sağlamakla kalmaz, aynı zamanda iklim değişikliğiyle mücadelede kritik bir öneme sahiptir(arval ve ark 2021). Tarım sektörü, küresel sera gazı emisyonlarının

önemli bir kaynağıdır, ancak doğru toprak yönetimi uygulamalarıyla bu emisyonlar büyük ölçüde azaltılabilir. Toprakların karbon depolama kapasitesinin artırılması, toprak sağlığının korunması ve suyun verimli kullanılması gibi stratejiler, tarımın çevresel etkilerini minimize etmek için güçlü araçlar sunmaktadır.

Toprak, karbonun depolandığı en büyük doğal rezervuarlardan biridir. Tarımda koruyucu tarım uygulamaları, organik madde artışı ve ağaçlandırma gibi yöntemlerle topraklarda daha fazla karbon tutulabilir. Ayrıca, toprak erozyonunun engellenmesi, sadece toprağın sağlığını korumakla kalmaz, aynı zamanda karbonun atmosferden uzaklaştırılmasına yardımcı olur. Erozyonun önlenmesi için uygulanan yöntemler, toprağın verimli yapısını muhafaza eder ve toprak kaybını engeller. Bu sayede, toprakların karbon depolama kapasitesi arttırılır.

Azotlu gübrelerin doğru zaman ve miktarda uygulanması, tarımda sera gazı emisyonlarını azaltan önemli bir adımdır. Aksi takdirde, aşırı azot kullanımı toprağa zarar verebilir ve özellikle azot oksit (N2O) salınımını artırabilir. Bu nedenle, gübreleme yöntemlerinin optimize edilmesi, emisyonların kontrol altına alınmasına katkı sağlar. Ayrıca, azotlu gübrelerin verimli kullanımı, tarımda daha az girdi ile daha fazla verim elde edilmesini mümkün kılar, bu da ekonomik olarak da faydalıdır.

Su, tarımın bel kemiğidir ve suyun verimli kullanılması toprak sağlığı üzerinde doğrudan etki yapar. Verimli sulama yöntemleri ve doğru su yönetimi, toprağın su tutma kapasitesini artırır ve bu da hem tarımsal verimliliği hem de toprağın karbon depolama kapasitesini iyileştirir. Su buharlaşmasının engellenmesi ve sulama suyu kayıplarının azaltılması, ekosistem dengesinin korunmasına yardımcı olur. Su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimi, yalnızca tarım alanlarını korumakla kalmaz, aynı zamanda toprakların daha uzun süre sağlıklı ve verimli kalmasına katkı sağlar.

Toprak sağlığı, karbon depolama kapasitesinin ve ekosistem dengesinin temel belirleyicilerindendir. Topraktaki biyolojik aktivitelerin artırılması, organik maddelerin daha verimli şekilde işlenmesini sağlar ve bu da toprak sağlığını iyileştirir. Toprak mikroorganizmalarının çeşitliliği ve biyolojik gübrelerin kullanımı, toprak yapısının iyileşmesine ve daha fazla karbonun toprakta depolanmasına olanak tanır. Ayrıca, monokültürden kaçınarak farklı bitki türlerinin ekilmesi, toprak canlılarının çeşitliliğini artırır ve uzun vadeli tarımsal verimliliği destekler.

Tarımda sürdürülebilir yönetim ve emisyon azaltımı için çiftçilerin eğitilmesi ve bilinçlendirilmesi kritik bir öneme sahiptir. Çiftçilere yönelik eğitim program-

ları ve tarımsal danışmanlık hizmetleri, yeni tarım tekniklerinin daha hızlı benimsenmesini sağlar. Bu eğitimler, çiftçilere doğru toprak yönetimi uygulamaları hakkında bilgi vererek, çevre dostu yöntemlerin yaygınlaşmasını sağlar. Ayrıca, bu tür programlar, tarımda daha verimli, düşük maliyetli ve sürdürülebilir uygulamaların benimsenmesine katkı sağlar.

Sürdürülebilir tarım uygulamaları yalnızca çevresel değil, aynı zamanda sosyal ve ekonomik faydalar da sağlar. Tarımsal üretimde kullanılan doğal kaynakların verimli yönetimi, çiftçilerin ekonomik olarak daha sürdürülebilir bir gelecek kurmasına yardımcı olur. Kooperatifler ve sosyal inovasyonlar gibi topluluk bazlı yaklaşımlar, çiftçilerin kaynakları daha verimli kullanmalarını sağlar. Ayrıca, bu tür yenilikçi yaklaşımlar, sürdürülebilir tarım uygulamalarının daha geniş bir şekilde benimsenmesini teşvik eder (Sharma, Bali, (2017).

Akıllı tarım teknolojileri, toprak yönetimini ve tarımsal üretimi daha verimli hale getirebilir. Toprak testleri, uzaktan algılama ve veri tabanlı yönetim sistemleri, tarımsal kararları optimize eder ve çevresel etkileri minimize eder. Bu teknolojiler, tarımda daha az kaynakla daha fazla üretim yapılmasına ve sera gazı emisyonlarının azaltılmasına olanak tanır.

Tarımda toprak yönetimi, çevre dostu uygulamaların artırılması ve iklim değişikliğiyle mücadele edilmesi açısından büyük bir potansiyele sahiptir. Toprakların sağlıklı ve verimli bir şekilde yönetilmesi, tarımda emisyonları azaltırken aynı zamanda tarımsal verimliliği artırır. Ayrıca, toprak yönetimi, su ve gübre kullanımı gibi kritik faktörlerin sürdürülebilir bir şekilde uygulanması, sadece çevreye duyarlı bir tarım sisteminin oluşmasını sağlamakla kalmaz, aynı zamanda tarım sektörünün ekonomik olarak daha güçlü ve uzun vadeli bir şekilde ayakta kalmasını temin eder.

Bu süreçlerin başarısı, çiftçilerin eğitilmesi, doğru politikaların uygulanması ve sürdürülebilir tarım yöntemlerine geçiş için gerekli ekonomik teşviklerin sağlanmasına bağlıdır. Tarımsal faaliyetlerdeki dönüşüm, sadece çevresel yararlar sağlamaz, aynı zamanda tarım toplulukları için ekonomik fırsatlar yaratır ve toplum genelinde daha sağlıklı, verimli ve dirençli ekosistemlerin oluşmasına katkı sağlar.

KAYNAKLAR

Aryal, J., Sapkota, T., Krupnik, T., Rahut, D., Jat, M., & Stirling, C. (2021). Factors affecting farmers' use of organic and inorganic fertilizers in South Asia. Environmental Science and Pollution Research International, 28, 51480 - 51496. https://doi.org/10.1007/s11356-021-13975-7.

Atav, V. (2024). Tarımsal Üretimde Derin Azotlu Gübreleme. Özal Tarım ve Gıda Bilimleri Dergisi, 1(1), 23-31.

Baran, M. F., Bellitürk, K., & Çelik, A. (2023). Çevresel Baskılar Ve Tarım.

Fageria, N., & Baligar, V. (2005). Enhancing Nitrogen Use Efficiency in Crop Plants. Advances in Agronomy, 88, 97-185. https://doi.org/10.1016/S0065-2113(05)88004-6.

Islam, S. M., Gaihre, Y. K., Islam, M. R., Ahmed, M. N., Akter, M., Singh, U., & Sander, B. O. (2022). Mitigating greenhouse gas emissions from irrigated rice cultivation through improved fertilizer and water management. Journal of Environmental Management, 307, 114520.

Sharma, L., & Bali, S. (2017). A Review of Methods to Improve Nitrogen Use Efficiency in Agriculture. Sustainability, 10, 1-23. https://doi.org/10.3390/SU10010051.

Van Grinsven, H. J., Holland, M., Jacobsen, B. H., Klimont, Z., Sutton, M. A., & Jaap Willems, W. (2013). Costs and benefits of nitrogen for Europe and implications for mitigation. Environmental science & technology, 47(8), 3571-3579.

Xu, G., Fan, X., & Miller, A. (2012). Plant nitrogen assimilation and use efficiency. Annual review of plant biology, 63, 153-82 . https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042811-105532.

Weber, K., & Burow, M. (2018). Nitrogen–essential macronutrient and signal controlling flowering time. Physiologia Plantarum, 162(2), 251-260.



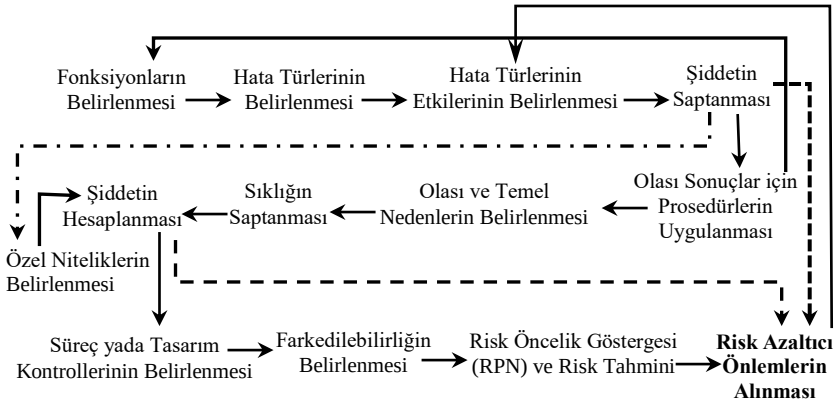
İş Sağlığı ve Güvenliği (İSG) Risk Değerlendirmesinde Önemli Bir Teknik: Hata Türleri ve Etkileri Analizi (FMEA)

İsmail Bentli[1] & Senem Şanlı[2]

[1] Doç.Dr., İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Merkez kampüs, Yeşilyurt/Malatya, ORCID ID:0000-0003-3775-7341
[2] Doç.Dr., Uşak Üniversitesi, Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu, Tıbbi Hizmetler ve Teknikler Bölümü, 1 Eylül kampüsü, Uşak, ORCID ID: 0000-0002-9379-4393

1. GİRİŞ

Hata Türü Etkileri Analizi (Failure Mode and Effect Analysis, FMEA), "*bir işletmeye ait müşterilerin talep ve beklentilerini karşılamak amacıyla nihai ürünün müşterilerin beğenisine sunulmadan önce proseslerde ve bu proseslerle birlikte düşünülmesi gerekli olan sistem, servis ve tasarım aşamalarındaki hataların tespit edilerek önlenmesine ilişkin organizasyon içerisinde kullanılan bir metottur"* şeklinde tanımlanabilir. Otomotiv sektöründe FMEA sistem, alt-sistem, süreç ve donanımların güvenilirliğini korumak için kullanılırken, işletmelerde her türlü operasyonel riskin değerlendirmesinde tercih edilmeye başlanmıştır (Sönmez ve Ünğan, 2017; Yücel, 2007). Daha genel olarak üretim yapan fabrikalarda proses, tasarım, sistem ve servis aşamalarındaki hataların tespit edilerek önlenmesine ilişkin ve organizasyon içerisinde kullanılan bir yöntemdir (Şekil 1). Literatürde FMEA'ın üretim sürecinde başarısızlığa yol açabilecek potansiyel hataların önlenmesi ile daha kaliteli ürün üretilmesi ile ilgilendiği bildirilmektedir (Görener ve Toker, 2013; Carlson, 2012; Braaksma vd, 2012; Yakıt, 2011; Yılmaz, 2000).



Şekil 1. FMEA prosesesin işleyişi (Carlson 2012)

Sürdürülebilir üretim, rekabet ve verimlilik açısından, İş Sağlığı ve Güvenliği (İSG) uygulamalarının önemi giderek artmaktadır. 6331 sayılı İş sağlığı ve Güvenliği kanunuyla zorunlu hale getirilen risk değerlendirilmesi, İSG yönetiminin en önemli ve kritik sürecidir. İşletmelerde risk değerlendirme süreci ve yöntem seçiminin sağlıklı ve etkin uygulanması zorunludur. Risk değerlendirme yöntem seçiminde, öncelikle otomotiv sanayinde kullanılan FMEA'ın diğer sektörlerde de tercih edilmeye başlandığı görülmektedir. Literatürde FMEA yönteminin İSG risk değerlendirmesinde nasıl kullanılacağına dair çalışmalar kısıtlı kalmıştır. Carlson (2012) yazmış olduğu FMEA kitabının diğer uygulamalar bölümünde İSG'ye uygulandığını bildirmektedir. İşletmeler için güvenilirlik çalışmalarına

yönelik sistem, tasarım ve süreç FMEA uygulamalarını ayrı ayrı açıklayan çalışmalar bulunurken, genel olarak operasyonel riskleri içine alan İSG'ye dair özel açıklamalar yetersiz düzeydedir (Birgören ve Yalçınkaya, 2019; Popov vd, 2016). Proaktif yaklaşımı nedeniyle, FMEA'ın risk değerlendirmesi olarak mühendislik alanı dışında klinik laboratuvarda (David and Dobreanu, 2015; Aksay vd 2012) ve hastanede (Aydan ve Kaya, 2017) kullanıldığı belirlenmiştir.

Risk değerlenme süreci; tehlikelerin tanımlanması, risklerin belirlenmesi ve analizi, risk kontrol tedbirlerinin kararlaştırılması, uygulanması, izlenmesi ve risk değerlendirmesinin yenilenmesi aşamalarını içermektedir (Risk Değerlendirme Yönetmeliği 2012). FMEA bu sayılan aşamaların hepsini kapsayan ve en uygun risk değerlendirme tekniği olarak karşımız çıkmaktadır. FMEA, ANSI/ASSE (American National Standard/The American Society of Safety Engineers) ve ISO (International Organization for Standardization) tarafından yayımlanan uluslararası risk değerlendirme standartlarında önemli risk değerlendirme yöntemleri arasında sayılmaktadır (Birgören ve Yalçınkaya, 2019). FMEA tekniğin en önemli dezavantajı, başarılı bir sonuç için uzmanlık, tecrübe ve iyi bir takım kabiliyeti gerektirmesidir. Bu nedenle kompleks/karmaşık sistemlerin FMEA ile analizi bezdirici ve zor olabilmektedir. Buna rağmen iyi kurgulanmış ve sürekli iyileştirmeye yönelik risk değerlendirme tekniklerinden biri olarak kabul edilmektedir (Özkılıç, 2014).

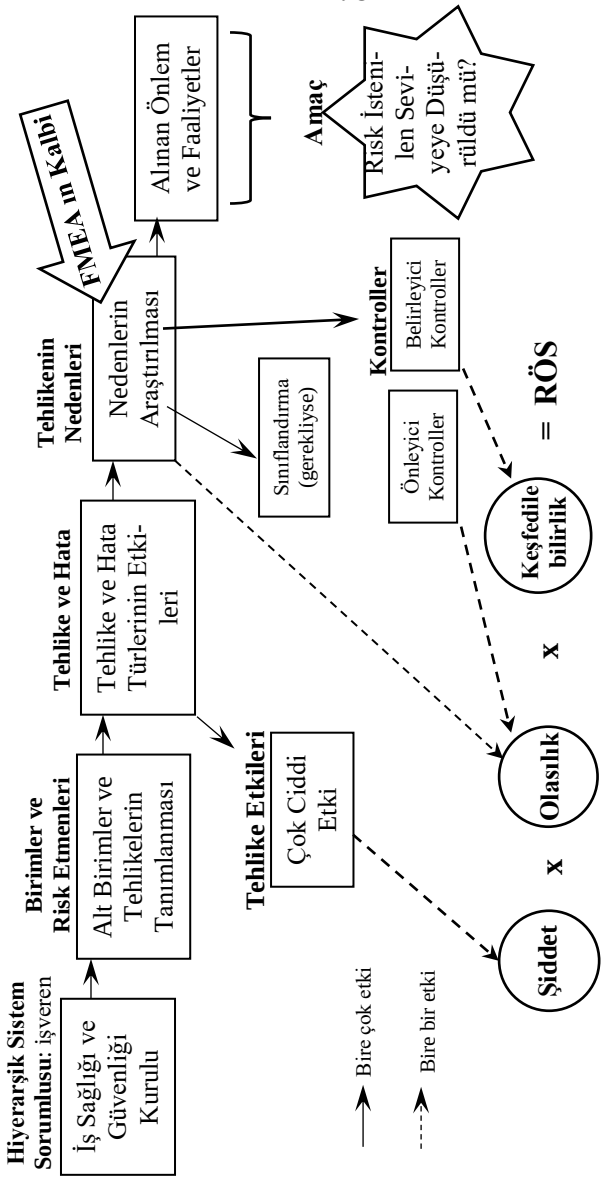
Bu çalışma, FMEA tekniğinin İSG kullanımına odaklanmasını ve etkin bir uygulama için dikkat edilmesi gereken hususları vurgulamaktadır. İSG'ndeki ve FMEA'daki temel kavramlar arasındaki farklılıklar, güvenilirlik boyutu, tehlike ve hatalardan nasıl kaçınılacağı anlatılmaktadır.

2. FMEA'ın GENEL ÖZELLİKLERİ

FMEA yönteminin İSG uygulaması zor ve zahmetli bir işlemdir. 6331 sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanununda (2012) "*Tehlike, zarar veya hasar oluşturabilecek potansiyel bir durumu, hareketi ya da herhangi bir durumu*" ifade ederken," *Risk, tehlikeden kaynaklanacak kayıp, yaralanma ya da zararlı sonuç meydana gelme ihtimalini*" ifade etmektedir. Tehlikeler genellikle tehlikeli davranış ve tehlikeli ortam olarak ikiye ayrılabilir. Tekstil fabrikasında dikkatsiz ürün yerleştirme veya yüksekten hammadde atılması tehlikeli davranış iken; ortam havasında lif tozu bulunması veya aydınlatmanın yetersizliği tehlikeli ortama örmek olarak verilebilir. Risk ise belirtilen tehlikelerden kaynaklanan her türlü yaralanma, hastalık veya zarar verme ihtimalidir.

FMEA (Failure Mode and Effect Analysis)'ın anlam karşılığı Hata Türleri ve Etkileri Analizidir (HTEA). Anlamından anlaşılacağı üzere ana kavram "*Hata*

Türü"dür. Hata türü "*Hata oluşturan ya da doğru çalışmayan durum*" ve "*Bir parça, madde, ürün, ekipman veya sürecin kendisinden beklenen fonksiyon veya zorunlulukları yerine getirememe ya da karşılayamama*" şeklinde tanımlanmaktadır (Carlson, 2012). FMEA ile işletmelerde risk değerlendirilmesi gerçekleştirilirken Şekil 2'deki aşamaların dikkatlice uygulanması istenir.



Şekil 2. FMEA'ın unsurları arasındaki mantık ilişkisi (Carlson, 2012).

FMEA tekniğinde hata türleri ise önceliklerine göre Risk Öncelik Sayısı (RÖS) hesaplanarak belirlenir. RÖS değeri aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$Risk\ Öncelik\ Sayısı\ (RÖS) = F * O * Ş \quad (1)$$

Burada;

F: Farkedilebilirlik (zarar meydana getirecek durumun keşfedilmesinin zorluk derecesi, 1-10 arası),

O: Her bir hata türünün gerçekleşme olasılığı (1-10 arası),

Ş: Şiddet (zararın ne kadar önemli olduğunun değeri, 1-10 arası)

RÖS değerlerine göre tehlike veya hatanın önlenmesi kararları şu şekilde verilmelidir (Özkılıç, 2014):

RÖS < 60 ise önlem almaya gerek yoktur.

60 ≤ RÖS ≤100 ise önlem alınması gerekir.

RÖS > 100 ise acil önlem alınması gerekir.

RÖS değerini azaltmak amacıyla, olası tehlike ve hata şekillerini veya nedenlerini önleyerek veya olumsuz etkilerinin en aza indirmek için tasarım, üretim süreci, malzeme veya üretim yöntemi gibi çeşitli unsurlarda değişiklik önerilir.

2.1. Hata Türlerinin Şiddet Etkisi

FMEA'daki hata türlerinin İSG açısından tehlikeye karşılık geldiği açıktır. Birçok FMEA uygulamasında da hata türlerinin tehlike tanımına uyduğu görülmektedir. Tablo 1'de çevre, güvenlik ve sağlık açısından görülebilecek şiddet seviyeleri ve tanımları verilmektedir. Şiddet seviyesinin değeri, hatanın ne kadar önemli olduğunun göstergesidir.

Tablo 1. FMEA'da çevre, güvenlik ve sağlık açısından şiddet seviyeleri

Şiddet Derecesi	Etki	Şiddetin Düzey Açıklaması
10	Uyarısız Gelen Tehlike	Felakete yol açabilecek etkiye sahip ve habersiz gelen potansiyel hatadır. Buna bağlı olarak ağır yaralanma veya ölümle karşılaşılabilir.
9	Uyarısız Gelen Tehlike	Yüksek hasara ve toplu ölümlere yol açabilecek etkiye sahip ve habersiz gelen potansiyel hatadır.
8	Çok Yüksek	Sistemin tamamen hasar görmesini sağlayan yıkıcı etkiye sahip ağır yaralanmalara, 3.derece yanık ve akut ölümcül hastalık vb. etkiye sahip hatadır.
7	Yüksek	Ekipmanı tamamen hasar görmesine sebep olan ve ölüme, zehirlenme, 3.derece yanık ve akut ölümcül hastalık vb. etkiye sahip hatadır.
6	Orta	Sistemin performansını etkileyen, uzuv ve organ kaybı, ağır yaralanma, kanser vb. yol açan hatadır.
5	Düşük	Kırık, kalıcı küçük iş görmemezlik, 2.derece yanık, beyin sarsıntısı vb. etkiye sahip hatadır.
4	Çok Düşük	İncinme, küçük kesik ve sıyrıklar, ezilmeler vb. hafif yaralanmalar ile kısa süreli rahatsızlıkların neden olduğu hatadır.
3	Küçük	Sistemin çalışmasını yavaşlatan hatadır. İlk yardım ve tıbbi tedavi gerektirmez.
2	Çok Küçük	Sistemin çalışmasında kargaşaya yol açan hatadır.
1	Yok	Hatanın etkisi yoktur.

3.2. Hata Türlerinin Olasılıkları

FMEA'da hata türlerini tehlikeler olarak kullanılacağı yukarıda belirtilmişti. Aynı şekilde riskleri de tehlikelerin olasılıkları olarak kullanmak mümkündür. Tablo 2 tehlikeli davranışların ve durumların olasılıklarını açıklamaktadır. Riskin olasılığının sağlıklı şekilde belirlemek için geçmiş kaza ve hastalık istatistiklerinin kullanılması gerekir. Ancak KOBİ niteliğindeki işletmeler genellikle kaza kayıt ve istatistikleri tutmamaktadır. Bu nedenle Risk değerlendirme ekibinin FMEA'a hakim ve tecrübeli olması zorunludur. İşletmelerde çalışanların katılımını sağlamak ve geçmiş olayları soruşturmak, tehlikelerin olasılıklarını belirlemede isabet şansını arttıracaktır.

FMEA'da hata türlerinin tehlikeleri ifade ettiği göz önünde alınarak, FMEA'daki RÖS hesabında riskler yerine tehlikelerin olasılıkları kullanılır. İş kazalarının olasılık tahmini sübjektif de olsa yapılabilirken, meslek hastalıkların çıkma olasılıklarını tahmin etmek aşırı deneyim gerektirir. Çünkü kazalar, kısa bir zaman içinde gerçekleşirken, meslek hastalıkları kimyasallara, biyolojik vb. etmenlere maruziyet nedeniyle on yıla yakın sürelerde gelişirler. Örneğin belli bir tekstil işletmesinde maskesiz çalışma olasılığı rahatlıkla tahmin edilebilirken, bundan kaynaklı hastalığın olasılığını tahmin etmek, özellikle de meslek hastalığı tespit edilmemiş ise oldukça zordur.

6331 İSG Kanununa göre (2012), işyeri hekimlerinin temel görevi koruyucu hekimliktir. İşyeri hekimi sağlık gözetimi yapar, işyeri ortamını etkileyen psikososyal, ergonomik, biyolojik, kimyasal ve fiziksel tehlike kaynaklarını saptayarak alınması gereken önlemleri kararlaştırır. Dolayısıyla proaktif yaklaşıma uygun olarak, henüz hiçbir hastalık emaresi olmasa dahi, gerekli önlemlerin alınması temel yaklaşımdır. İşyeri hekimleri iş sağlığı risk değerlendirmesinde puanlanmaları titizlikle yapmak durumundadırlar. FMEA'da hastalıkların görülme sıklığını tahmin etmek yerine, tehlikeye maruziyetin sıklığı puanlanacağından dolayı, risklerin olasılık boyutunu hesaba katmak daha kolay olacaktır.

Tablo 2. FMEA'da hata olasılık skorları

Skor	Hata Olasılığı	Açıklama
10	Ortaya çıkma olasılığı oldukça yüksek olan hatalar	Birim işleme zaman aralığında hataların ortaya çıkma olasılıkları çok yüksektir (Örneğin haftada bir gibi). Hata olasılığı (ihtimali) 0.5'den büyüktür.
9	Ortaya çıkma olasılığı çok yüksek olan hatalar	Birim işleme zaman aralığında hataların ortaya çıkma olasılıkları yüksektir. Hata olasılığı (ihtimali) 0.2-0,5 aralığındadır.
8	Ortaya çıkma olasılığı yüksek olan hatalar	Birim işleme zaman aralığı boyunca hataların ortaya çıkma olasılıkları tekrar tekrar vardır (Örneğin iki haftada bir gibi). 0.1-0.2 aralığındadır.
7	Ortaya çıkma olasılığı yüksek olan hatalar	Birim işleme zaman aralığı boyunca hataların ortaya çıkma olasılıkları vardır (Örneğin iki haftada bir gibi). Hata olasılığı (ihtimali) 0.05-0.1 aralığındadır.
6	Ara sıra olan hatalar	Birim işleme zaman aralığı boyunca hataların ortaya çıkma olasılıkları ortadır (Örneğin ayda bir gibi). Hata olasılığı (ihtimali) 0.01-0.05 aralığındadır.
5	Ara sıra gözüken hatalar	Birim işleme zaman aralığı boyunca hataların ortaya çıkma olasılıkları ortadır (Örneğin iki ayda bir gibi). Hata olasılığı (ihtimali) 0.001- 0.01 aralığındadır.

4	Ara sıra nadiren gözüken hatalar	Birim işleme zaman aralığı boyunca hataların ortaya çıkma olasılıkları küçüktür (Örneğin üç ayda bir gibi). Hata olasılığı (ihtimali) 0.001- 0.01 aralığındadır.
3	Ortaya çıkma olasılığı nispeten az olan hatalar	Birim işleme aralığı boyunca hataların ortaya çıkma olasılıkları düşüktür (Örneğin altı ayda bir gibi).
2	Ortaya çıkma olasılığı düşük olan hatalar	Birim işleme aralığı boyunca hataların ortaya çıkma olasılıkları çok düşüktür (Örneğin yılda bir gibi).
1	Ortaya çıkma olası olmayan hatalar	Birim işleme aralığı boyunca hataların ortaya çıkma olasılıkları sıfıra yakındır (Örenğin iki-üç yılda bir).

3.3. Hatanın Fark Edilebilirliği

FMEA'nın güvenilirlik uygulamalarında hatanın fark edilebilirliği, hatayı keşfetme zorluk derecesi olarak tanımlanmaktadır. İSG uygulamalarında ise alınan önlemlerin etkinliği olarak değerlendirilmelidir (Popov vd. 2016). Örneğin bir tekstil fabrikasında koruma gözlüğü kullanılmadığında, bunun tespiti kolay ve gerekli her türlü önlem alınmış ise fark edilebilirlik puanı düşük seçilecek ve buna bağlı olarak toplam RÖS değerini aşağı çekecektir. Burada önemli olan koruma gözlüğü kullanılmadığında gerekli önlemlerin devrede olmasıdır. Bu açıklamalara göre FMEA'da hatanın fark edilebilirliğine göre puanlanması Tablo 3'de verilmektedir.

4. Atık Tekstil Ön Lifleme Makinesine Uygulanması

FMEA tekniği, FMEA'nın kapsam ve sınırlarının belirlenmesi, kapsama göre uygun bir ekibinin kurulması ve incelenecek sürecin belirlenmesi ile başlar (Şekil 2). Süreç yürütülürken Tablo 4'de gösterildiği gibi FMEA amacını, ekip rollerini, sorumluluklarını, hata türlerini ve iyileştirmeye yönelik aksiyonların tanımının yapıldığı bir çalışma sayfası kullanılır. Tablo 4 FMEA çalışmasının nasıl yürütüldüğünü anlamak açısından da önemlidir. Bu Tabloda sütunların anlamları açıklanmak istenirse (Özkılıç, 2014);

Alt sistem modülü ve fonksiyonu: FMEA mümkün olduğunca alt süreçlere bölünmeli ve her bir alt süreç için tasarım fonksiyonları tanımlanmalı ve buna göre özel ekipler kurulmalıdır. Çok disiplinli ve çapraz fonksiyonlu FMEA takım sorumluluğu için ekibin her üyesi kendi süreci dışında diğer süreçlerle de ilgilenmelidir.

Potansiyel hata türü: Geçmiş dönemlere ait bütün belgelere ve akış diyagramlarına göre sürecin her adımında "burada nasıl bir hata oluşabilir?" sorusu sorulur ve oluşabilecek potansiyele sahip hata türlerini Tablo 4'ün ikinci sütununa bütün özellikleri ile belirtmelidir.

Tablo 3. FMEA'da fark edilebilirlik (keşfedilebilirlik) skorları

Skor	Fark Edilebilirlik	Fark Edilebilirlik Olasılığı ve Alınan Önlemler
10	**Fark Edilemez**	Potansiyel hatanın nedeninin ve takip eden hatanın keşfedilebilirliği mümkün değildir. Doğrulama veya kontrollerle bir eksiklik veya kusurun fark edilebilirliği sıfıra yakındır veya fark edilemez durumdadır. Hemen hemen hiçbir güvenlik önlemi alınmamıştır.
9	**Çok Az**	Potansiyel hatanın nedeninin ve takip eden hatanın keşfedilebilirliği çok uzak ithimaldir. Tehlike önlemek amacıyla kişisek koruyucu donanım kullandırılmaktadır.
8	**Az**	Potansiyel hatanın nedeninin ve takip eden hatanın keşfedilebilirliği uzak bir ihitimaldir. Tehlike önlemek amacıyla kişisek koruyucu donanım ve uyarı işaretleri kullanılmaktadır.
7	**Çok Düşük**	Potansiyel hatanın nedeninin ve takip eden hatanın keşfedilebilirliği çok düşük bir ihtimaldir. Tehlike önlemek amacıyla kişisek koruyucu donanım, uyarı ve idari kontroller yapılmaktadır.
6	**Düşük**	Potansiyel hatanın nedeninin ve takip eden hatanın keşfedilebilirliği düşük bir ihtimaldir. Tehlike önlemek amacıyla kişisek koruyucu donanım, uyarı ve idari kontroller yapılmaktadır.
5	**Orta**	Potansiyel hatanın nedeninin ve takip eden hatanın keşfedilebilirliği orta düzeydedir. Mühendislik önlemleri devreye girmiştir.
4	**Yüksek Ortalama**	Potansiyel hatanın nedeninin ve takip eden hatanın keşfedilebilirliği yüksek ortalama düzeyindedir. Mühendislik kontrolleri ve önlemleri devreye girmiştir.
3	**Yüksek**	Potansiyel hatanın nedeninin ve takip eden hatanın keşfedilebilirliği yüksek bir ihtrimaldir. Mühendislik kontrolleri yapılmakta ve etkili önlemler alınmaktadır.
2	**Çok Yüksek**	Potansiyel hatanın nedeninin ve takip eden hatanın keşfedilebilirliği çok yüksek düzeydedir. Doğrulama veya kontrollerle bir eksiklik veya kusurun varlığı hemen hemen kesin fark edilecektir. Tehlikelerle kaynağında mücadele edilmektedir.
1	**Hemen Hemen Kesin**	Potansiyel hatanın nedeninin ve takip eden hatanın keşfedilebilirliği hemen hemen kesin ihtimaldir. Tehlikelerle kaynağında mücadele edilmektedir.

Potansiyel lokal ve sonuç hata etkileri: Tablo 4'ün üçüncü ve dördüncü sütunlarında, olası hatanın gerçekleşmesi durumunda ekipmanı veya makineyi kullanacak operatör veya çevre üzerindeki etkileri göz önüne alınır. Burada lokal ifadesi ile olası hatanın alt sisteme olan etkilerinden; sonuç ifadesi ile de alt sistemin hatasının sürecin işlevi üzerindeki güncel etkilerinden bahsedilmektedir. Lokal hata etkilerinin incelenmesi, sistemin o düzeydeki destek teçhizatının veya düzeltici çalışmaların etkinliğini belirlemeye yardımcı olacaktır.

Şiddet: Hatanın gerçekleşmesi durumunda operatör ve çevre üzerinde ne kadar etki yaratacağı analiz edilir. Analiz sonucu şiddet tablosundaki (Tablo 1) 1-10 skor aralığına değerlendirilerek Tablo 4'de ilgili sütuna kaydedilir. Hataların şiddeti genellikle felaket getirici, çok yüksek, yüksek, orta ve küçük hasar olarak sınıflandırılır.

Kritik Güvenlik (Cr) hata türü: Ele alınması gereken kritik hataları tanımlamak amacıyla kullanılır. Bir hatanın sonuç etkisi, tehlikeli veya felakete yol açabilir şeklinde sınıflandırılıyorsa ilgili hata, kritik güvenlik hata türü olarak değerlendirilmeli ve ilgili sütuna Evet anlamında "E" yazılmalıdır.

Potansiyel hata nedenleri: "Bu tehlike nasıl olabilir?" sorusuna yanıt aranır. Potansiyel hata nedeni sütununa hatanın meydana gelmesine neden olabilecek sebepler ve koşullar yazılır. Potansiyel nedenler açık ve net olmalıdır. Bunun için ekip içerisinde beyin fırtınası yapılır ve yardımcı analizlerden (sebep-sonuç diyagramları, hata ağacı analizleri) yararlanılır.

Olasılık: Grup üyelerinin bilgi birikimi ve tecrübelerine göre hata türünün oluşma sıklığı belirlenir. Tablo 2'deki 1-10 skor aralığına göre puanlandırılır. Eğer var ise olasılık hesaplamak amacıyla istatistiki olarak makine yeterlilik indislerinden faydalanılır.

Mevcut kontroller/Hata tespiti: "Bu nedenin etkisini tespit edebilecek, önleyecek yada en aza indirebilecek mekanizmalar var mı?" sorusuna yanıt aranır. Daha sonra tehlikenin veya hatanın olmasının önüne geçmeye yönelik önleyici kontroller ve hatayı tespit etmeye yarayan mekanizmalar listelenir.

Fark edilebilirlik (Keşfedilebilme olasılığı): Kontroller ve araştırmalar sonucunda olası hatanın istenmeyen sonuçlara yol açmadan tespit edilebilme derecesidir. Personelin hatayı saptama olasılığının diğer bir ifadeyle keşfedilebilirlik değeri, Tablo 3'de fark edilebilirlik tablosunda 1-10 skor aralığına göre puanlanır.

RÖS (Risk Öncelik Sayısı): FMEA ekibi her hata türü için 1-10 skalasında belirledikleri şiddet, olasılık ve fark edilebilirlik değerlerinin çarpımları ile 1-1000

arasında değişen bir Risk Öncelik Katsayısını (RÖS) belirlerler. Bu katsayı ilgili hata türünün risk barındırma kritiklik derecesini göstermektedir. Hata türleri RÖS değerlerine göre en yüksek olandan en düşük olacak şekilde sıralanır. Öncelik sırasına göre, düzeltici, önleyici ya da kalite iyileştirici faaliyetler geliştirilerek RÖS değeri azaltılmaya çalışılır.

Önerilen Faaliyetler: FMEA ekibi hata olasılığını ve hatanın gerçekleşmesi durumunda şiddetini azaltmak ve hatanın keşfedilme kabiliyetini arttırmak için gerekli önerilerinde bulunurlar ve bunları çalışma sayfasında belirtirler. FMEA ekibi hata türünün olasılığını azalmak amacıyla üretim ve akış yöntemleri, plan, program, teknik şartname, tasarım, çevre ve koruma şartlarında değişiklik vb. önerilerinde bulunabilirler. Fark edilebilirlik yeteneğini geliştirmek için kontrol sıklıklarını ve kontrol yöntem güvenilirliğinin geliştirilmesini önerebilirler.

Sorumluluk ve Tamamlanma Zamanı: Önerilen faaliyetler için sorumluluk sahibi kişiler ve işlemin bitiş sürelerinin belirtildiği alandır.

Yapılan faaliyetler: "Sorunu düzeltmek amacıyla neler yapıldı?" sorusunun cevabı bu sütuna yazılır. Önerilen faaliyetler (mühendislik uygulamaları, teknoloji veya yazılım değişikliği, eğitim gerekliliği vb) uygulandıktan sonra, faaliyet sonucu ile ilgili kısa bir açıklama ve faaliyetin gerçekleştirildiği tarih belirtilir.

Faaliyet Sonuçları: Önleyici/düzeltici faaliyet tamamlandıktan sonra yeniden şiddet, olasılık ve fark edilebilirlik dereceleri belirlenir ve yeni RÖS değerine göre Risk Tedbirleri kararlaştırılır. Gerçekleştirilen faaliyetlerin RÖS'ü nasıl değiştirdiği ekip tarafından yorumlanmalıdır.

İSG'de kontrollerin ve önlemlerin düzenli ve etkin bir şekilde uygulanması esastır. Bu mantıktan yola çıkılarak Tablo 4 uygulanırken fark edilebilirlik skorlarının kontrol edilerek alınması önerilir. Örneğin belli bir tehlike için çalışanlar kişisel koruyucu donanımı etkin bir şekilde kullanmıyorlar ise fark edilebilirlik skoru 8-9 yerine, hiçbir güvenlik önlemi alınmamış olarak değerlendirme yapılıp 10 puan verilebilir. Risk değerlendirme ekibi ihtiyatlı davranarak yüksek puanlı durumu tercih etmesinde fayda vardır. Ancak bütün çalışanların kişisel koruyucu kullandığından emin olunduğunda ve gerekli önlemleri alındığında fark edilebilirlik skoru düşürülmelidir.

Bu bölümde atık tekstil işleyen fabrikada karşılaşılan iş güvenliği ve iş sağlığı riskleri kullanılarak FMEA'ın nasıl uygulanacağı izah edilecektir. Bu çalışanın gerçekleştirdiği açma-parçalama (ön lifleme) makinasına besleme operasyonunu ele alalım. Bu operasyonda çalışan iki eliyle tuttuğu atık tekstili, önünde bulun-

duğu açma-parçalama makinesine besleyerek parçalatmaktadır. FMEA'da bu işlem, elle besleme operasyonu fonksiyon başlığı altına yazılır. Bu işlemede çalışanın elleri ve parmakları yaralanabilir. Çalışan tekstilden çıkan toksik lif tozuna maruz kalmaktadır. Aydınlatmanın yetersiz olduğu ve görünürlüğü azalttığını düşünelim. Tablo 4'e bu fonksiyonla ilgili "parmakların kesiciyle teması", "lif parçalarının yüze ve göze teması", "lif tozu salınımı" ve "Aydınlatmanın yetersizliği" olmak üzere dört tehlike türü yazılmıştır. Burada operatörün nadiren çıkarsa da düzenli olarak toz maskesi, koruyucu eldiven ve gözlük kullandığı, ancak işlem sırasında yüz koruyucu olarak yüz koruyucu siperin kullanılmadığı, solunum yolunu korumak için bir lokal havalandırma sisteminin ve görünürlüğü arttırmaya sağlayan aydınlatma sistemlerinin yetersiz kaldığı varsayılmaktadır.

FMEA tablosunda dört tehlike türünün nedenleriyle birlikte yol açacağı kaza, yaralanma, hastalıklar ve gerekli önlemler ilgili sütunlara yazılır. Tehlike-hata türleri, nedenleri, sonuçları ve önlemler net bir ifadelerle yazılmalıdır. Burada "tehlikeli çalışma ve durum", "tehlikeli çevre", "idari önlemlerin eksikliği" gibi genel ve muğlak ifadelerden kaçınılmalıdır.

Elin kesici ile teması tıbbi müdahale gerektiren bir yaralanma ile sonuçlanacağı için şiddete 6 (Ş = 6) verilmiştir. Elin kesiciyle teması yılda birkaç defa olduğundan olasılık 4 O = 4'dir. Elin ve parmakların kesicileyle temas olasılığı diğer bir deyişle yaralanma olasılığıdır. Elin bantlı besleyiciyle hangi sıklıkla temas ettiği çalışanlarla ve ramak kala olay raporlarıyla tahmin edilebilir. KKD kullanımı ve idari kontroller yeterli olmadığı için fark edilebilirlik 7 (F = 7) verilmiştir. Atık tekstil beslemede lif tozları göz rahatsızlığına neden olabilir. Bu durumda periyodik göz kontrollerine de dayanılarak şiddet 7 dir (Ş = 7). Sürekli belli oranda lif tozu çıkışı olduğu duruma göre olasılık 9 (O = 10) alınabilir. Koruyucu gözlü kullanılmasına rağmen yüzü tamamen koruyan koruyucu siper tercih edilmediğinden, idari ve mühendislik kontrolleri yetersiz kaldığından fark edilebilirlik 7 (F = 7) verilmiştir. Elde edilen RÖS değeri 168 olduğundan acil önlem alınması gereklidir. Mühendislik uygulamaları (makine koruyucu, tamir, bakım, onarım) ve idari uygulamalar (eğitim, tatbikat, uyarı işaretleri vb) verilmesi sonucunda yeni RÖS değeri 48'e düşmüştür.

Tekstil işletmelelerinde lif tozu salınımının bir meslek hastalığına (bisinosiz) yol açma potansiyeli vardır (Bakırcı ve Tümerdem 2002). Şiddet düzeyi saptanırken Bisinosiz de göz önüne alınarak şiddet 9 (Ş = 9) alınmıştır. Hiçbir hastalık gözlenmemiş olsa bile tehlikeye, yani lif tozuna düzenli maruziyet olduğu için (Tablo 3'e göre haftada birden sık) O = 9 verilmiştir. Solunum yolunun korunması için yeterli önlem alınmadığı için de fark edilebilirlik 10 (F =10)'dur. Diğer tehlikeler için FMEA uygulaması Tablo 4'de verilmiştir.

Tablo 4. FMEA çalışma sayfası

SİSTEM: Atık işleyen Tekstil Fabrikası HATA TÜRLERİ ve ETKİLERİ ANALİZİ (FMEA, HTEA) TARİH:
TEHLİKE ANALİZİ SAYFA:
ALT SİSTEM: Açma- Parçalama (Ön Lifleme) HAZIRLAYAN: İş Sağlığı ve Güvenliği Kurulu

Alt Sistem Modülü & Fonksiyonu	Potansiyel tehlike veya hata türü	Potansiyel Lokal Hata Etkileri	Potansiyel Sonuç Hata Etkileri	Şiddet	Cr	Potansiyel Hata Nedenleri	Olasılık	Mevcut Kontroller/Hata Tespiti	Farkedilebilirlik	RÖS	Önerilen Faaliyetler	Sorumluluk ve Tamamlanma Zamanı	Yapılan Faaliyetler	Faaliyet Sonuçları			
														Şiddet	Olasılık	Farkedilebilirlik	RÖS
Atık tekstili açma-Parçalama	Parmakların kesiciyle teması	El-parmak kesilmesi, yaralanması	Üretimde kesinti İş gücü kaybı	6	E	Makine koruyucu kullanılmaması, Eğitim verilmemesi	4	Makine koruyucu devreye alınmalı, KKD kullanılmakta, Eğitim ve tatbikat yaptırılmalı	7	168	Makine koruyucusu takıldı, bakım-onarımı yapıldı. Eğitim ve tatbikatlar yapılmalı	İSG Kurulu, 1 hafta içinde tamamlandı.	Tamir, Bakım, Onarım, Eğitim, Tatbikat	6	2	4	48
	Lif parçalarının yüze ve göze teması	Göz rahatsızlığı	Üretimde kesinti, İş gücü kaybı	5	E	Yüz Koruyucu kullanmama, Eğitim verilmemesi	8	Gözlük, Maske, eldiven kullanımı var, Yüz siperi kullanılmıyor.	8	320	Yüz maskesi kullanımı, Sağlık Göz muayenesi, Eğitim Uyarı	İSG Kurulu, 1 ay içinde tamamlandı	Sağlık ve Göz muayenesi, Yüz siperi kullanımı, Eğitim	5	2	3	30
	Lif tozu salınımı	Mesleki solunum rahatsızlığı, Bisinosiz	Üretimde kesinti, İş gücü kaybı, Ortam havasının kirlenmesi	9	E	Yerel Havalandırmanın yetersizliği, Lif tozu yayılımı	9	Yerel havalandırma yetersiz, Maske kullanılmakta, Toz ve termal konfor ölçümler yapılmamış,	10	810	Lokal havalandırma yenilenmeli, Fiziksel risk etmen ve Toz ölçümleri yapılmalı Sağlık gözetimi yenilenmeli	İSG Kurulu, 3 ay içinde tamamlandı	Sağlık muayenesi, Toz ölçümü, Fiziksel risk etmenleri ölçümü yapıldı.	9	3	5	135
	Aydınlatmanın yetersizliği	İş yapılmasının zorluğu Tehlikeyi fark edilme sorunu, El-parmak yaralanması	Üretim kaybı, İş gücü kaybı, Stres ve yorgunluk	8	E	Tali aydınlatma sisteminin yetersizliği, Mevzuata uygun aydınlatmanın yapılmaması	10	Tali aydınlatma yeterli çalışmamaktadır. Aydınlatma ölçümleri yapılmamıştır.	5	400	Fiziksel risk etmenleri ölçümleri yapılmalı, Etkli aydınlatma tasarımı yapılmıştır. Eğitim	İSG Kurulu, 2 ay içinde tamamlandı	Fiziksel risk etmenleri ölçümü yapıldı. Tali aydınlatma ve kullanımı yenilendi.	8	4	2	64

5. SONUÇ

Ülkemizde risk değerlendirme yöntemleri olarak risk matrisleri, Fine-Kinney yöntemleri kullanılırken, son yıllarda FMEA tercih edilmeye başlanmıştır. Özellikle makine kullanımının yüksek olduğu sektörlerde, FMEA yönteminin İSG risk değerlendirme uygulamalarında tercih edilmesinde büyük fayda görülmektedir. Aynı zamanda FMEA yöntemi, iş güvenliği risklerinin değerlendirmesine ek olarak iş sağlığı risklerinin değerlendirmesinde de başarılı bir şekilde kullanılabilmektedir. FMEA yönteminde, hatalara bağlı tehlikelerin fark edilebilirliğinin tespitine bağlı olarak yöntem başarısı artmaktadır. Öyle ki tecrübeli bir ekip tarafından uygulandığında, sıfıra yakın kaza ve hastalık gerçekleşme olasılığı bulunmaktadır. Bu amaca yönelik olarak ayrıntılı açıklama yapılmış ve örnek bir uygulamaya yer verilmiştir.

Araştırmanın Etik Yönü

Uşak Üniversitesi, İş Sağlığı ve Güvenliği Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans tez çalışması kapsamında yapılan tüm açıklamalarda, herhangi bir çıkar çatışması ve etik ihlali bulunmamaktadır.

KAYNAKLAR

6331 İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu. (2012). Resmî Gazete, Sayı: 28339.

Aksay, K., Orhan, F., & Kurutkan, M. N. (2012). Sağlık Hizmetlerinde Bir Risk Yönetimi Tekniği Olarak FMEA: Laboratuvar Sürecine Yönelik Bir Uygulama. Sağlıkta Performans ve Kalite Dergisi, 4(2), 121-142.

Aydan, M., & Kaya, S. (2017). Hata Türü ve Etkileri Analizi (HTEA): Üniversite Hastanesinde Bir Uygulama. Hacettepe Sağlık İdaresi Dergisi, 20(4), 475-502.

Bakırcı, N. & Tümerdem, N. (2002). Pamuk İplik Üretimi ve İşçi Sağlığına Etkileri. TTB Mesleki Sağlık ve Güvenlik Dergisi, 3(9), 12-23.

Birgören, B. & Yalçınkaya, M. (2019). İş Sağlığı ve Güvenliği Risk Değerlendirmesinde Hata Türleri ve Etkileri Analizinin (FMEA) Kullanımı. International Journal of Engineering Research and Development, 11(1), 41-50.

Braaksma, A.J.J., Meesters, A.J., Klingenberg, W. & Hicks, C. (2012). A quantitative method for failure mode and effects analysis. International Journal of Production Research, 50(23), 6904-6917.

Carlson, C.S. (2012). Effective FMEAs: Achieving safe, reliable, and economical products and processes using failure mode and effects analysis, John Wiley & Sons, USA, 419 p.

David, R.E. & Dobreanu, M. (2015). Failure modes and effects analysis (FMEA)-An assessment tool for risk management in clinical laboratories, Acta Medica Transilvanica, 20(4), 130-134.

Görener, A., & Toker, K. (2013). Quality Improvement in Manufacturing Processes to Defective Products using Pareto Analysis and FMEA. Beykent Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi, 6(2), 45-62.

İş Sağlığı ve Güvenliği Risk Değerlendirmesi Yönetmeliği (2012). Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı Resmi Gazete, 28512. Ankara.

Özkılıç, Ö. (2014). Risk Değerlendirmesi, TİSK, Yayın No:338, 2014.

Popov, G., Lyon, B.K. & Hollcroft, B. (2016). Risk assessment: A practical guide to assessing operational risks, John Wiley & Sons, USA, 453 p.

Sönmez, Y. & Ünğan, M.C. (2017). Hata Türü Etkileri Analizi ve Otomotiv Parçaları Üretiminde Bir Uygulama. İşletme Bilimi Dergisi (JOBS), 5(2), 217-245.

Yakıt, O. (2011). Hata Türü Etkileri Analizi'nde Kullanılan Risk Öncelik Sayısı Hesaplama Yöntemlerinin Karşılaştırılması: Gamateks Tekstil San. ve Tic. A.Ş. Örneği. Süleyman Demirel Üniversitesi Vizyoner Dergisi, 3(5), 107-124.

Yılmaz, B.S. (2000). Hata Türü ve Etki Analizi, Dokuz Eylül Üniversitesi SBE Dergisi, 2(4), 133-150.

Yücel, Ö. (2007). Konfeksiyon Üretiminde Hata Türü ve Etkileri Analizi. Tekstil ve Konfeksiyon, 17(2), 126-131.

.

BÖLÜM 34

Bir Yayla Evinin Elektrik Enerjisi İhtiyacını Karşılayacak Şebekeden Bağımsız Fotovoltaik Sistem Tasarımı

Abtullah Tuğcu [1] & Nuri Ceylan[2] & Ahmet Uslu[3]

[1] Dr. Öğr. Üyesi, Kurum Bilgisi: Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Tavşanlı Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, 43300, Tavşanlı, Türkiye, ORCID: 0000-0001-7911-4198
[2] Dr. Öğr. Üyesi, Kurum Bilgisi: Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Tavşanlı Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, 43300, Tavşanlı, Türkiye, ORCID: 0000-0002-9311-5418
[3] Dr. Öğr. Üyesi, Kurum Bilgisi: Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Tavşanlı Meslek Yüksekokulu, Mimarlık ve Şehir Planlama Bölümü, 43300, Tavşanlı, Türkiye, ORCID: 0000-0001-8745-423X

1. GİRİŞ

Fosil yakıt kaynaklarının sınırlı olması, artan elektrik talepleri ve insanların küresel ısınmanın tehlikeleri konusundaki farkındalığı nedeniyle yenilenebilir enerji, elektrik üretimi için bir kaynak olarak her geçen gün daha fazla ilgi görmeye başlamıştır. Elektrik üretimi için kullanılan fotovoltaik tabanlı sistemler, şebekeye bağlı (On-Grid) ve şebekeden bağımsız (Off- Grid) olmak üzere iki türe ayrılabilir. Şebekeye bağlı sistemler, üretilen enerjinin fazlasını şebekeye satılabilir ya da yeterli enerji üretilmediğinde şebekeden satın alabilir. Şebekeden bağımsız bir sistem, ulusal elektrik şebekesine erişim olmayan ve gerekli elektrik enerjisinin yalnızca yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlandığı uzak alanlar için kullanılır (Khezri & Aki, 2022; Cho & Valenzuela, 2019; Hemmati vd., 2020; Wang vd., 2020; Adeyemo & Amusan, 2022; Jamreon & Vongkoon, 2023).

Şebeke yayılımı veya kurulumu, elektriklendirme için ilk seçenekler olsa da bu yaklaşım, gereken büyük yatırımlar nedeniyle daha düşük enerji gereksinimi olan bölgeler için ekonomik olmaktan çıkmaktadır (Diaz vd.; 2010).

Gelişmekte olan ülkelerde, bazı kırsal alanlar ulusal elektrik şebekesine erişimden yoksundur ve şebekenin bu alanları kapsayacak şekilde genişletilmesi önemli miktarda sermaye yatırımı gerektirmektedir. Sonuç olarak dizel jeneratörler, hava kirliliği ve sera gazı emisyonlarının neden olduğu çevresel dezavantajlara rağmen, bu tür bölgelerde yaygın bir elektrik kaynağı olarak ortaya çıkmıştır. Son zamanlarda, her kırsal haneyi genellikle güneş paneli, şarj kontrol cihazı, inverter ve aküden oluşan bir fotovoltik sistem ile donatmaya yönelik artan bir ilgi vardır (Zhi & Yang, 2023).

Güneş enerjisi, yenilenebilir bir enerji kaynağı olarak elektrik üretimi için ilgi çekmiş ve dünya genelinde başarılı uygulamalar göstermiştir. Bu teknoloji çevre dostudur, sera gazı yaymaz ve gürültü kirliliği üretmez. Ayrıca bol miktarda bulunur, uygun maliyetlidir ve kapasitesi ihtiyaç halinde kolayca genişletilebilir (Akikur vd., 2013).

Fotovoltaik güneş enerjisi teknolojisinin, elektrik üretme konusundaki kanıtlanmış yeteneği ve dünya çapındaki birçok uygulamanın başarılı olması nedeniyle, şebekeden uzak kırsal alanları elektriklendirme çabalarında büyük ilgi görmüştür (Joshi vd.; 2009). Şebekeden bağımsız fotovoltaik güneş sistemleri, elektrik enerjisini gündelik yaşama uygulama çabalarında kritik roller üstlenmiştir. Şebekeden bağımsız sistemlerin tasarımı, amaçlanan kullanım için gerekli olan yüke bağlıdır. Fotovoltaik sistem teknolojisi, kırsal alanlarda tek bir evin enerji

talebini karşılamanın çok daha ekonomik bir yoludur (Diaz vd.; 2011). Ancak, geleneksel enerji kaynaklarının aksine, yenilenebilir enerji kaynakları enerji talebini karşılamak için sürekli bir güç sağlayamaz çünkü bazı kaynaklar mevsime göre bolluk ya da kıtlık gösterebilir (Ijumba & Wekesah, 1996).

Ülkemiz coğrafi konumu itibariyle Akdeniz güneş kuşağı içerisinde yer alır. Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası (GEPA) verileri incelendiğinde, ortalama yıllık toplam güneşlenme süresinin 2741,07 saat/yıl, ortalama yıllık toplam ışınım şiddetinin 1527,46 kWh/m²-yıl, ortalama günlük toplam ışınım şiddetinin ise 4,18 kWh/m²-gün olduğu görülmektedir (EİGM, 2024a).

2024 Eylül ayı TEİAŞ raporları incelendiğinde, ülkemizde üretilen toplam enerjiye ait kurulu güç miktarının **114.143 MW'a**, toplam santral sayısının ise **31.530 adete ulaştığı görülmektedir.** Lisanssız güneş kurulu gücü bir önceki aya göre artarak 18.690 MW'a ulaşırken, lisanslı güneş kurulu gücü bir önceki aya göre düşüş yaşayarak 1.728 MW seviyesine gerilemiştir. Rapordan ülkemizin güneş enerjisi kurulu gücü 16.962 MW olarak görülmektedir. Toplam elektrik üretiminin yaklaşık %10,69'u güneş enerjisinden elde edilmiştir (TEİAŞ, 2024).

Çatı üstü güneş enerjisi sistemleri, teşvikler ve düşen maliyetler sayesinde gelişme göstermiştir. Şebekeden bağımsız güneş enerjisi sistemlerinin önemli bir özelliği, enerji erişimi ihtiyacını karşılamak için hızla dağıtılabilir, güvenilir ve çoğu durumda ekonomik olarak da sürdürülebilir bir seçenek sunmasıdır. Bu uygulamalar, enerji sistemlerinin yaygınlığını sürdürebilir bir şekilde artırabilir, enerji güvenliğini iyileştirebilir, yerel ve bölgesel CO_2 emisyonlarını azaltabilir ve enerji fiyatlarının düşmesini teşvik edebilmektedir (Fu vd., 2021).

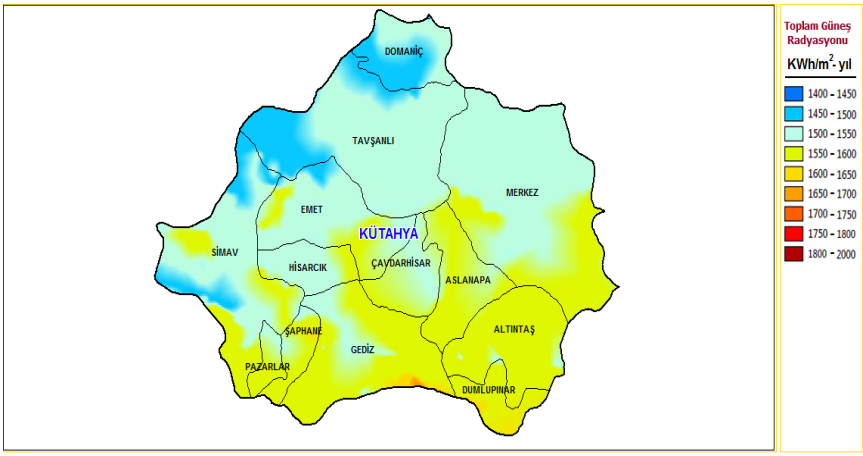
Bu çalışmada, Kütahya ili Simav ilçesi Kalkan Köyü Ayvalı Mevkii 39.093151, 29.107958 koordinatlarında bulunan bir yayla evinin, elektrik enerjisi ihtiyacını güneş enerjisinden karşılamak amacıyla tasarlanan çatı üstü şebekeden bağımsız sabit bir fotovoltaik sistem, ekonomiklik ve uygulanabilirlik açısından incelenmiştir. Çalışmada, yayla evi için tasarlanan sistem ekipmanları ve bu ekipmanların seçimi hakkında detaylı bilgiler sunularak maliyet unsurları ile birlikte değerlendirmelerde bulunulmuştur.

Çalışma, fotovoltaik sistem tasarımı ile ilgilenen araştırmacılara ve kendi enerjisini güneş enerjisinden sağlamak isteyenlere ulaşmayı hedeflemekte, optimum enerji üretimi ile birlikte verimli bir yapının oluşturulması ve ekonomik analiz açısından bir model olma niteliğindedir.

MATERYAL VE YÖNTEM

Ülkemizin batısında yer alan Simav ilçenin yüz ölçümü 1557 km^2 dir. Karasal iklim kuşağında yer alan ilçede yıllık ortalama sıcaklık 11,4 ^oC, ortalama yağış miktarı 854 mm dir. İlçenin % 62,80'i dağlık ve ormanlık; % 32,22'si tarım alanı; % 2,19'u mera; % 2,79'u yerleşim alanıdır. İl merkezine uzaklığı, 143 km dir (Anonim,2024).

Simav ilçesinin yıllık toplam ışınım şiddeti, Şekil 1'den görüldüğü üzere, 1500-1600 kWh/m^2-yıl dır. Ülkemizin toplam güneş radyasyonu ortalaması dikkate alındığında, Simav ilçesinin güneş enerjisi sektöründeki yatırımlar için uygun olduğu düşünülmektedir.



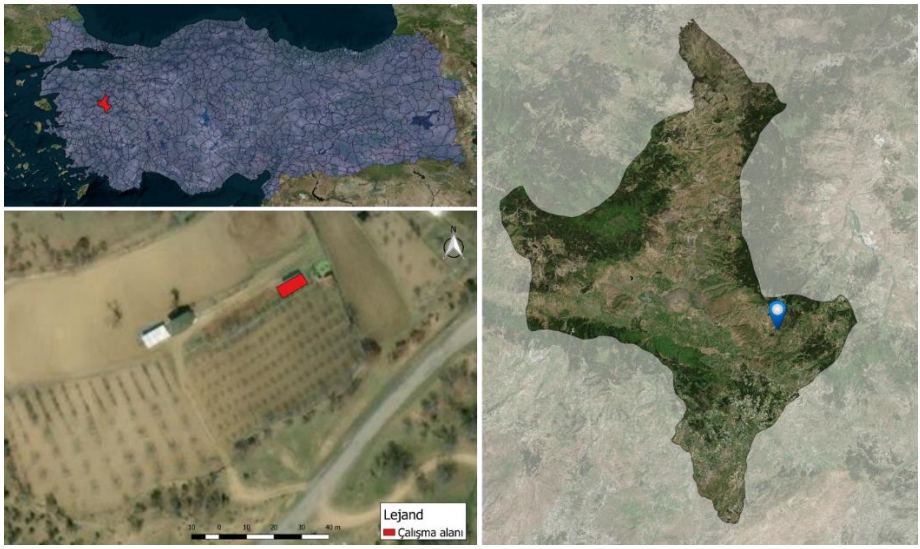
Şekil 1. Kütahya ili güneş enerjisi potansiyel atlası (EİGM, 2024a).

Tablo 1'de Simav ilçesinin ortalama sıcaklık (ºC), ortalama radyasyon (kWh/m^2) ve ortalama güneşlenme süreleri (h) görülmektedir (EİGM, 2024b).

Tablo 1. Simav ilçesi Ortalama sıcaklık, radyasyon ve ortalama güneşlenme süreleri

Aylar	Ortalama Sıcaklık (ºC)	Ortalama Radyasyon (kWh/m^2)	Ortalama Güneş-lenme Süresi (h)
Ocak	3,4	1,72	4,27
Şubat	3,1	2,30	4,92
Mart	6,1	3,73	6,32
Nisan	10,7	4,93	7,17
Mayıs	15,3	6,05	9,21
Haziran	19,4	6,47	10,49
Tem-muz	21,9	6,31	11,08
Ağustos	21,4	5,71	10,38
Eylül	17,2	4,66	8,92
Ekim	12,3	3,30	6,44
Kasım	7,4	2,05	4,77
Aralık	4,0	1,51	3,65

Bu çalışmada, Şekil 2'de görülen Simav İlçesi Kalkan Köyü Ayvalı Mevkiinde, elektrik şebekesinin bulunmadığı bir yayla evinin elektrik ihtiyacını güneş panellerinden karşılamak üzere şebekeden bağımsız (Off-Grid) sabit çatı üstü uygulamalı bir enerji sisteminin tasarımı ve maliyet analizi yapılmıştır.



Şekil 2. Çalışma alanının coğrafi konumu

Bir evin günlük enerji ihtiyacı, kişilerin enerji tüketim davranışlarının farklılığı nedeniyle değişiklik gösterebilir. Bu nedenle gerçeğe daha yakın bir tasarım için haftalık ya da aylık enerji tüketimleri dikkate alınarak bir hesaplama yapmak daha doğru olacaktır. Haftalık ya da aylık tüketilen toplam enerjiden günlük ortalama enerji tüketimi hesaplanabilir (Alkan vd., 2014; Zenk, 2018).

Simav İlçesi Kalkan Köyü Ayvalı mevkiinde, yıl boyunca hayvancılıkla uğraşan üç kişilik bir ailenin elektrik enerjisi ihtiyacının belirlenmesi için yayla evinin haftalık ve günlük enerji tüketim değerleri Tablo 2'de görülmektedir. Çalışma kapsamında yayla evinde yer alan elektrikli cihazlar içerisinde, 1 adet buzdolabı (A^{++}), 1 adet çamaşır makinesi (A^{++}), 1 adet televizyon (40" Led), 1 adet uydu alıcısı, 1 adet fırın (davul tipi, çift rezistans), 1 adet yayık makinesi, 7 adet led ampul, 3 adet akıllı telefon şarjı bulunmaktadır.

Tablo 2. Yayla evinin haftalık enerji ihtiyaç çizelgesi (URL-1-2)

Elektrikli Aletler	**Adet**	**Haftalık Çalışma Süresi (h)**	**Güç (W)**	**Haftalık Enerji Tüketimi (Wh)**
Buzdolabı (A^{++})	1	168	36	6048
Çamaşır Makinası (A^{++}) 5 kğ	1	2	650	1300
Televizyon (40" Led)	1	35	65	2275
Uydu alıcısı	1	35	25	875
Fırın (davul tipi, çift rezistans)	1	1	1300	1300
Yayık Makinası	1	3	250	750
Led Ampul (İç mekân)	5	35	20	3500
Led Ampul (Dış mekân)	2	28	20	1120
Akıllı Telefon şarjı	3	14	5	210
İnverter Stand-by Güç Tüketimi	1	84	15	1260
Toplam Haftalık Enerji Tüketimi				18638
Toplam Günlük Enerji Tüketimi				2662,57

Tasarlanan fotovoltaik sistemin matematiksel modellemesinde Çizelge 2'de yer alan elektrikli aletlerin çalışma süreleri ve bir saatte tükettikleri enerji miktarları dikkate alındığında yayla evinin haftalık 18638 Wh (18,638 kWh), günlük 2662,57 Wh (2,662 kWh) enerji ihtiyacı olduğu belirlenmiştir.

Çalışma kapsamında, yayla evinde bulunan elektrikli ürünlerin harcadığı enerji miktarları (1) ve (2) nolu denklemler yardımıyla hesaplanır (Alkan vd., 2014, Zenk, 2018, Yayılı Kılıç & Adalı, 2023)

*Cihazın harcadığı toplam enerji (Wh) = saatte harcadığı enerji (W) * çalışma saati (h)* (1)

$\eta_{sistem} = \eta_{panel} x \eta_{akü} x \eta_{inverter}$ (2)

Tüm elektrik sistemlerinde olduğu gibi güneş enerjisi sistemlerinde de üretilen gücün tamamını yüke aktarmak mümkün değildir. Tasarımı yapılan sistemde kullanılan ekipmanların verimlilik değerlerine bağlı olarak enerji kayıpları meydana gelir. Sistem üzerindeki ekipmanların verimlilik oranları farklıdır. Son yıllarda güneş enerjisi üretim ekipmanlarındaki teknolojik gelişmeler bu kayıpları en aza indirmiştir. Tasarlanan sistemde, kullanılan ekipmanların verimlilik analizleri dikkate alındığında, fotovoltaik panellerinin verimliliği (η_{panel}) %80, akülerin verimliliği ($\eta_{akü}$) %80 ve inverter verimliliği ($\eta_{inverter}$) %90 olarak kabul edilmiştir (Alkan vd., 2014, Akgül vd., 2021) . Bu durumda sistem verimliliği denklem (2) yardımıyla;

η_{sistem} = 0,80x0,80x0,90 = 0,58 olarak hesaplanır.

Tasarımı yapılan sistemde, ekipman verimliliğinden kaynaklı enerji kayıpları dikkate alındığında üretilmesi gereken enerji, yükün enerjisinden daha büyük olacaktır. Bu durumda üretilmesi gereken enerji denklem (3) yardımıyla hesaplanır (Alkan vd., 2014, Yayılı Kılıç & Adalı, 2023)

Yükün enerjisi (YE) = Üretilmesi gereken enerji (ÜGE) x η_{sistem} (3)

Buna göre 2662,57 Wh'lik yük enerjisini karşılamak için üretilmesi gereken enerji miktarı,

ÜGE = 2662,57/0,58 = 4590,63 Wh olarak hesaplanır.

Sistem verimi ve üretilmesi gereken enerji miktarı belirlendikten sonra güneşlenme süresine ve günlük enerji ihtiyacına dikkate alınarak fotovotaik panel sayısı hesaplanır. Panel sayısını belirlemek için (4) nolu denklemden yararlanılır (Alkan vd., 2014, Zenk, 2018, Yayılı Kılıç & Adalı, 2023).

$$Panel\ sayısı = \frac{Günlük\ enerji\ ihtiyacı}{Bir\ güneş\ panelinin\ gücü\ x\ Günlük\ güneşlenme\ süresi}$$ (4)

Bu hesaplamada, günlük enerji ihtiyacının üretilmesi gereken enerji değerine eşit olması beklenmektedir (Akgül vd., 2021). Sisteme ait panel sayısının belirlenmesinde güneşlenme süresinin en az olduğu Aralık ayı verileri dikkate alınarak, enerjinin tüm yıl boyunca noksansız olarak elde edilmesi amaçlanmıştır (Yayılı Kılıç & Adalı,2023). 230 Wp'lik panel kullanılması durumunda panel sayısı denklem (4) yardımıyla,

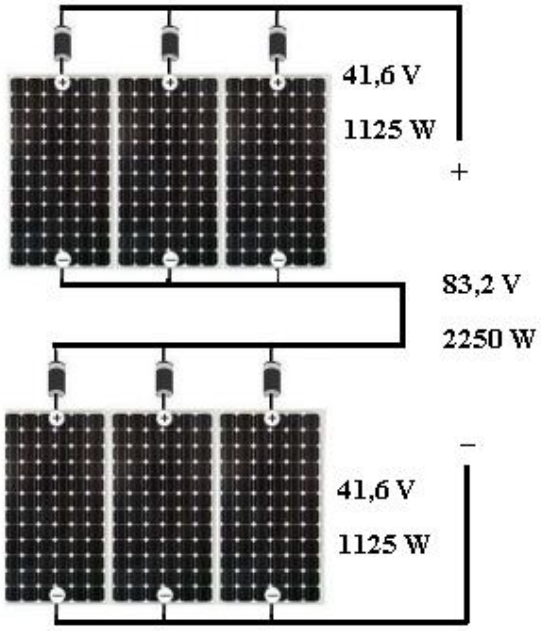
Panel sayısı = 4590,63/(230 x 3,65) = 5,46 ≈ 6 adet olarak hesaplanmıştır.

Kurulumu önerilen sistemde üretim ile tüketim değerlerini dengelemek ve sistemin boyutlandırılması için panel, inverter ve akü parametrelerinin doğru seçilmesi son derece önemlidir. Panel sayısının belirlenmesi 230 Wp gücündeki paneller kullanılarak yapılmıştır. Ancak 230 Wp ile 375 Wp'lik panel maliyetleri arasında çok büyük bir fiyat farkı yoktur. (URL-7). Sistemim toplam kurulum maliyeti düşünüldüğünde, finansal açıdan büyük bir yük olmayacağı için 230 Wp paneller yerine 375 Wp paneller kullanarak fotovoltaik sistem gücünü 2,25 kW'a çıkarmak oldukça mantıklıdır. Güneş radyasyonundaki günlük dalgalanmalar, panel kirliliği ve zamanla aşırı ısınma v.b nedenlerden dolayı fotovoltaik panellerdeki performans kayıpları göz önüne alındığında iyi bir tercih olabilir. Fotovoltaik panel kapasitesini ihtiyaçtan daha fazla tutmak pratikte yaygın bir uygulamadır (Akgül vd., 2021). Seçimi yapılan panellerin elektriksel ve mekaniksel özelliklerine ait katalog bilgileri Tablo 3'te görülmektedir.

Tablo 3. Gazioğlu 375 Wp A^+ Half-Cut Monokristal Perc Yeni Nesil Güneş Paneli Kataloğu (URL-3).

Elektriksel Özellikler		**Mekaniksel Özellikler**	
Maks. Güç (P_{max})	375 Wp	Hücre Teknolojisi	Half Cut Perc Mono
Açık Devre Gerilimi (V_{oc})	41,6	Hücre Sayısı (adet)	120
Maks. Güç Gerilimi (V_{mp})	34,4	Ağırlık (kg)	20,3
Kısa Devre akımı (I_{sc})	11,45	Panel Boyutu (mm)	1756x1040x40
Maks. Güç Akımı (I_{mp})	10,89	Panel Kalınlığı (mm)	40
Modül verimliliği (%)	20,5	Bağ. Kutusu Koruma Sınıf	IP68
Maks. Sis. Anma Gerilimi	1500 VDC	Maks. Rüz./Kar Yük Day. (Pa)	2400/5400
Çalışma Sıcaklık Aralığı	- 40 ~ +85 ^oC	Bağlantı Tipi (Konnektör)	MC4 uyumlu

Tasarımı yapılan sistemde, Gazioğlu Solar Enerji firmasına ait 25 yıl performans, 10 yıl ürün garantisi olan 375 Wp A^+ Half-Cut Monokristal Perc yeni nesil güneş panelleri kullanılmıştır. Şekil 3'te seçimi yapılan 6 adet panel, 3'erli 2 seri yapılarak bu iki seriyi de birbirine paralel bağlayarak oluşturulan 2250 W, 83,2 V çıkışlı modüller için boyutlandırma ve bağlantı şeması görülmektedir.



Şekil 3. 2250 W, 83,2 V çıkışlı modüllerin boyutlandırılması ve bağlantısı

Tasarımı düşünülen sistemde, enerjinin üretilmediği dönemlerde enerji ihtiyacı akülerden karşılanacağı için akü kapasitesi, kapalı geçen gün sayısı kadar enerjinin depo edileceği düşünülerek hesaplanır (Alkan vd., 2014, Akgül vd., 2021). Akü kapasitesi, günlük 4590,63 Wh'lik enerji ihtiyacı, 0,65 deşarj faktörü ve 1,5 kapalı geçen gün sayısı için dikkate alındığında denklem (5) yardımıyla,

$$Akü\ kapasitesi = \frac{Günlük\ enerji\ ihtiyacı}{Deşarj\ olma\ faktörü} x kapalı\ geçen\ gün\ sayısı \quad (5)$$

Akü kapasitesi = (4590,63/0,65) x 1,5 = 10593,76 Wh olarak hesaplanır.

Akü sayısı, akü kapasitesine ve akünün kaç saat boyunca ne kadar akım üretebileceğini gösteren amper-saat (Ah) değerine göre belirlenir. İki adet 12 V'luk akü seri olarak bağlanırsa sistem gerilimi 24 V olur. Kullanılacak akü sayısını, denklem (6) yardımıyla hesaplanır (Zenk, 2018).

$$Akü\ sayısı = \frac{Gerekli\ akü\ kapasitesi}{Akü\ kapasitesi\ x\ Sistem\ gerilimi} \quad (6)$$

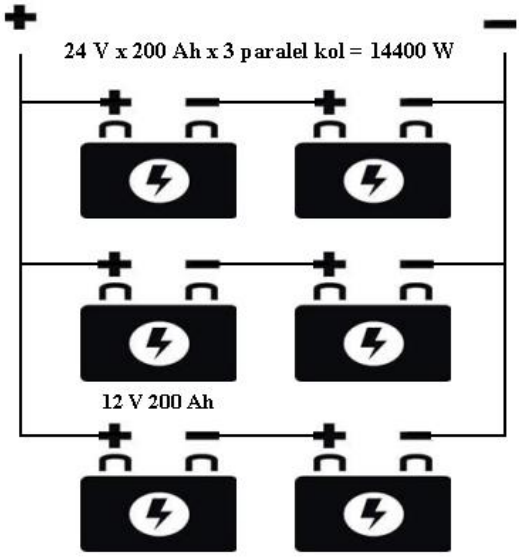
200 Ah'lik akülerin kullanımı halinde 10593,76 Wh enerjinin depolanabilmesi için 2 adet akünün seri bağlı olduğu 3 paralel kola ihtiyaç duyulacaktır. Bu

durumda toplamda her biri 200 Ah olan 6 adet aküye ihtiyaç vardır. Tasarımı yapılan bu sistem 200x24x3 = 14400 Wh enerji depolayabilir.

Tasarlanan sistem için bakım gerektirmeyen Orbus 12 V, 200 Ah nano karbon jel akülerin seçimi yapılmıştır. Tablo 4'te seçimi yapılan akünün katalog bilgileri, Şekil 4'te 24 V çıkışlı 6 adet akünün boyutlandırılması ve bağlantısı görülmektedir.

Tablo 4. Orbus 12 V, 200 Ah Nano Karbon Jel Akü Katalog Bilgileri (URL-4)

ÖZELLİKLER			
Nominal Voltaj	12 V	Maksimum Deşarj Akımı	1600A
Nominal Kapasite	25ºC - 200 Ah	Ölçüler	522 x 238 x 222 mm
Maksimum Şarj Akımı	40A	Ağırlık	60,0 kg



Şekil 4. 6 akü ile 24 V çıkış için akü boyutlandırma ve akü bağlantısı

Sistem tasarımı açısından şebeke bağlantısı, kurulum gücü, faz sayısı ve kullanılan panellerle uyumlu bir inverter seçimi son derece önemlidir. Tasarımı yapılan sistemde yayla evindeki elektrikli cihazların kullanımı için 220 V AC tek bir faza ihtiyaç vardır. Bunun için güneş panellerinde üreteceğimiz DC elektriği akü bankasından AC'ye çevirecek bir invertere ihtiyaç duyulacaktır.

Şebekeden bağımsız inverter boyutlandırılmasında, panellerden üretilen doğru akım (DC) değerini, yayla evinde kullanılacak alternatif akım (AC) değerine dönüştürmek için kullanılacak inverterin, yükün çekebileceği maksimum gücü kaldırabilecek kapasitede olması gerekir. Tasarımı yapılan yayla evi için, buzdolabı, çamaşır makinası, televizyon, uydu alıcısı, fırın, yayık makinası, aydınlatma gibi elektrikli ev aletlerinin aynı anda çalışırken yakalanan toplam güç değeri dikkate alınır. Çizelge 2'deki cihazların güç değerleri dikkate alındığında; 36 W + 650 W + 65 W + 25 W + 1300 W + 250 W+ (20 x 7) W = 2466 W değeri elde edilir. Neticede yaklaşık 2,5 – 3 kW değerine sahip şebekeden bağımsız inverter tercih edilmelidir.

Tasarımını yaptığımız sistem için şebekeden bağımsız, maksimum güç noktası takibi (MPPT) ile panellerden maksimum verim almamızı sağlayacak, kurulu gücümüze ve panellerle uyumlu LEXRON 3KW 24-HV yüksek voltaj tam sinüs akıllı inverter seçilmiştir. Tablo 5'te seçimi yapılan inverterin özellikleri görülmektedir.

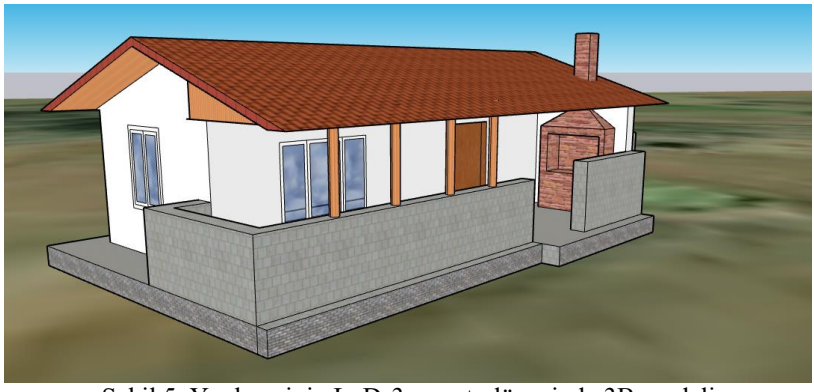
Tablo 5. LEXRON 3KW 24V-HV MPPT 40-500 Tam Sinüs Akıllı İnverter Kataloğu (URL-5)

MODEL		HV-3KW-24V	
Maksimum Güç		3000 VA/3000W	
AC GİRİŞ		**BATARYA**	
Çalışma Voltaj	230 VAC	Batarya Voltajı	24 VI
Seç. Voltaj Aralığı	90-280 VAC (Ev alet. İç.)	Değişken Şarj Voltajı	28.2 V
Nominal Frekans	50 / 60 Hz (Oto.alg.)	Aşırı Şarj Koruması	32 VI
AC ÇIKIŞ		**ŞARJ KONTROLLER & AC Ş**	
AC Gerilim Regülasyonu	230 VAC ± 5%	PV Şarj Cihazı Tip	MPPT
Ani Gerilim Gücü	6000 VA	Maks. PV Giriş Voltajı	500 V
Verimlilik (Pik)	>94%	Maks. PV Giriş Gücü	3000
Otomatik Geçiş Zamanı	20 (ms),(Ev alet. için)	MPPT Çalış. Voltaj Aralığı	40~50
FİZİKSEL ÖZELLİKLER		Maks. Solar Şarj Akımı	100A
Boyut	395x285x118 mm	Maks. AC Şarj Akımı	60A
Net Ağırlık	6,5 kg	Maks. Şarj Akımı	100A
ÇEVRESEL ÖZELLİKLER			
Bağıl Nem	5% ~ 95%	Depolama Sıcaklığı	-15 ~
Çalışma Sıcaklığı	0 ~ 40 °C	Gürültü	< 50 d

Çalışma kapsamında, maksimum ve minimum dizi gerilimi, maksimum ve minimum MPPT gerilimi, inverter maksimum DC akımı, inverter MPPT maksimum kısa devre DC akımı, DC yükleme faktörü gibi hesaplamalar panel inverter uyumluluğu açısından incelemiş ve seçimi yapılan panel ve inverterin önerilen sistem için uygun olduğu görülmüştür.

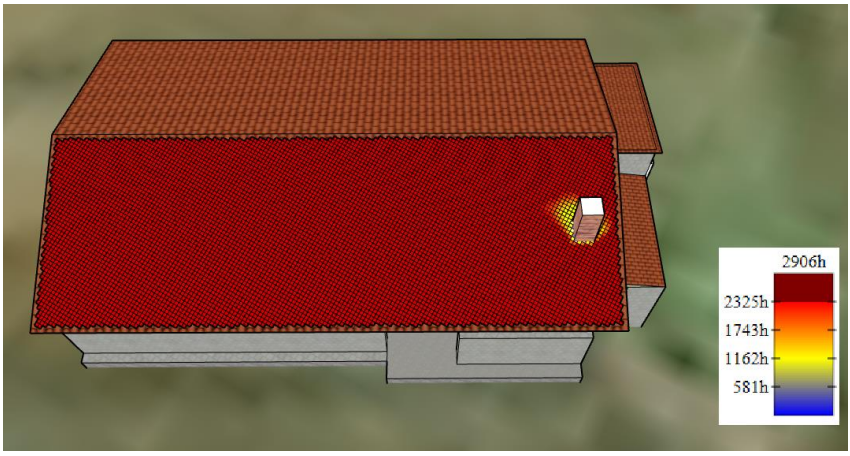
2. ÇALIŞMA ALANININ TASARIMI, GÜNEŞLENME SÜRESİ ANALİZİ VE PV MODÜL YERLEŞTİRME

Bu bölümde ilk olarak SketchUp programı aracılığıyla çalışma alanı olarak belirlenen yayla evinin LoD-3 ayrıntı düzeyinde 3B modeli oluşturulmuştur. Çalışma alanını 3B modellemek için arazinin konumu seçilmiş ve alanın uydu görüntüsü SketchUp'a yüklenmiştir. Yayla evinin rölöve ölçü değerleri esas alınarak, LoD-3 ayrıntı düzeyinde 3B modeli oluşturulmuştur. 3B model, SketchUp'ın Geolocation işlevi kullanılarak coğrafi olarak konumlandırılmıştır. Oluşturulan 3B modele gerçekçi görünüm kazandırmak ve yapının görselliğini arttırmak için renklendirme ve doku kaplama işlemleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 5'te çalışma alanının LoD-3 ayrıntı düzeyinde 3B modeli görülmektedir.



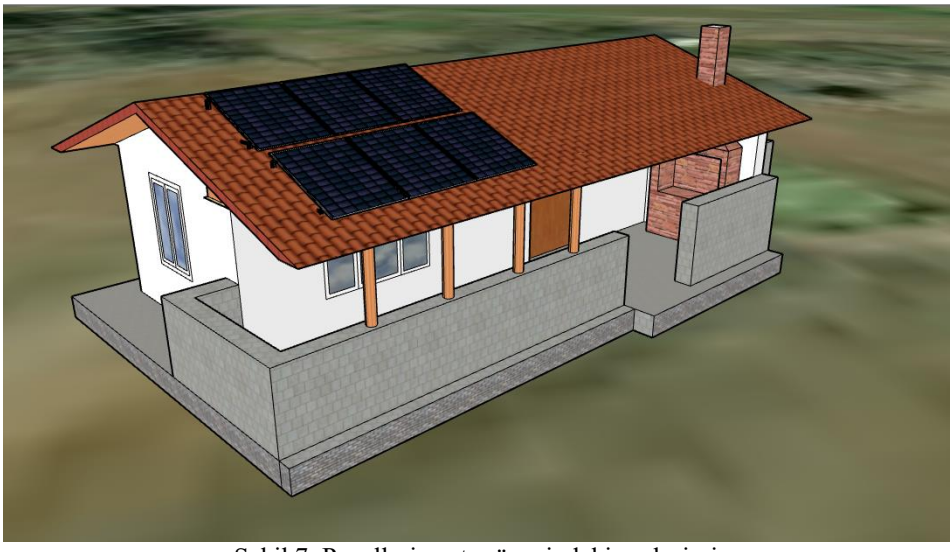
Şekil 5. Yayla evinin LoD-3 ayrıntı düzeyinde 3B modeli

Daha sonra SketchUp yazılımının SunHours eklentisi aracılığıyla yayla evinin güneye bakan çatı yüzeyinin yıllık aldığı güneşlenme süresinin mekânsal dağılımı analiz edilmiştir. Şekil 6'da yıllık güneşlenme süresinin mekânsal dağılımının simülasyonu gösterilmektedir.



Şekil 6. Çatı yüzeyindeki yıllık güneşlenme süresinin mekânsal dağılımı

Şekil 6 incelendiğinde; yayla evinin güneye bakan çatı yüzeyinin aldığı, yıllık toplam güneşlenme süresi değerinin ortalama 2325 ila 2906 saat aralığında olduğu, bacanın etrafında gözlemlenen güneşlenme süresi dağılımındaki mekânsal heterojenliğin, bacanın çatı yüzeyini gölgelemesinden kaynaklandığı görülmektedir. Şekil 7'de, 3'erli 2 seriyi birbirine paralel bağlayarak oluşturulan, 2250 W, 83,2 V çıkışlı 6 adet panelin çatı yüzeyindeki yerleşimi gösterilmektedir.



Şekil 7. Panallerin çatı yüzeyindeki yerleşimi

3. MALİYET ANALİZİ

Şebekeden bağımsız sistemlerde ilk yatırım maliyeti, sistem tasarımına ve enerji ihtiyacına göre değişir. Tasarımı yapılan güneş enerjisi sistemi, ulusal şebeke bağlantısının olmadığı bir bölge için şebekeden bağımsız ve çatı üstü sabit sistem olarak planlanmıştır. Şebekeden bağımsız bu sistemde ekipman maliyetlerine ilave olarak, kiremit çatı montaj seti, işçilik ve nakliye (kurulum maliyetinin % 10'u) ile beklenmeyen giderlerde (kurulum maliyetinin % 5'i) maliyete dahil edilmiştir. Tablo 6'da yayla evi enerji sisteminde kullanılacak elemanların piyasa fiyatları araştırılarak birim maliyetleri ile sistemin kurulum maliyet değeri görülmektedir.

Tablo 6. Şebekeden bağımsız sabit bir sistemin maliyet tablosu (URL-6-7-8-9-10-11-12-13)

Kurulum Maliyet Unsurları	**Adet**	**Birim Fiyatları (₺/Adet)**	**Sabit Sistem Maliyeti (₺)**
Panel (375 Wp)	6	3220	19320
Akü (200Ah 12V)	6	10158	60948
İnverter (MPPT'li)	1	10812	10812
Solar Kablo (m)	30	40	1200
MC4 Konnektör (3'lü paralelleme)	2	480	960
MC4 Konnektör (Tekli)	2	50	100
Kiremit çatı montaj seti (6 panel)	1	5093	5093
İşçilik + Nakliye	1	10000	10000
Diğer (Kutu, Beklenmeyen giderler)	1	4967	4967
Sistem Kurulum Maliyeti (₺)			113400

Tablo 6 dikkate alındığında yayla evi için kurulumu düşünülen şebekeden bağımsız sabit sistemin ilk yatırım maliyeti 113400 ₺ olarak hesaplanmıştır.

4. Sonuç ve Öneriler

Küresel çevresel kaygılar, artan enerji talepleri ve yenilenebilir enerji teknolojilerindeki gelişmeler dikkate alındığında güneş enerjisi, tükenmez bir kaynak olması, çevre dostu olması ve kullanımının hızla yaygınlaşması nedeniyle yenilenebilir enerji kaynakları arasında öne çıkmaktadır. Ülkemiz coğrafi konumu sebebiyle güneşlenme süresi açısından oldukça avantajlı bir bölgededir. Güneş ışınlarından elektrik enerjisi üretilmesi ile ilgili olarak devletimiz, son yıllarda vatandaşlarını çeşitli teşvik ve proje imkânlarıyla desteklemektedir.

Bu çalışmada, Kütahya ili Simav ilçesi Kalkan Köyü Ayvalı Mevkiinde 39.093151, 29.107958 koordinatlarında bulunan bir yayla evinin elektrik enerjisi

ihtiyacını güneş enerjisinden karşılamak amacıyla çatı üstü şebekeden bağımsız sabit bir fotovoltaik sistem, ekonomiklik ve uygulanabilirlik açısında incelenmiştir. Çalışmada, yayla evi için tasarlanan sistem ekipmanları, bu ekipmanların seçimi hakkında detaylı bilgiler sunularak maliyet unsurları ile birlikte bir değerlendirme yapılmıştır. Çalışma, ulusal şebeke bağlantısı açısından enerji iletim ve dağıtım hatlarının yetersiz olduğu kırsal bölgelerin elektrik enerjisi ihtiyacının karşılanmasına imkân tanımaktadır.

Elektrik enerjisinin yıl boyunca noksansız olarak elde edilebilmesi amacıyla güneşlenme süresinin en az olduğu Aralık ayı verileri dikkate alınarak şebekeden bağımsız bu sistem, 6 adet 375 Wp'lik monokristal paneller kullanılarak sistemin kurulu gücü 2,250 W (2,25 kW) olarak tasarlanmıştır. Panellerden üretilecek elektrik enerjisi miktarı, güneşin az olduğu sabah ve akşam saatlerinde etiket değerlerinden daha az olacaktır. Böylelikle Simav ilçenin Aralık ayı ortalama güneşlenme süresi dikkate alındığında, yaklaşık 4 saatlik bir güneşlenme süresi ile günlük 9,000 Wh'lik (9 kWh) elektrik enerjinin üretilebileceği görülmektedir.

Tasarımda fotovoltaik panellerinin maksimum güç noktasında çalışmasına imkan tanıyan MPPT özelliğine sahip yüksek voltajlı 3 kW 24 V tam sinüs akıllı inverter kullanılmıştır. Ayrıca akü grubunun güç kapasitesi 14,400 Wh'tir. Kullanıcılar gündüz saatlerinde hem panellerden hem de akülerden enerji desteği alabilecektir. Gece saatlerinde ise fotovoltaik panellerin doldurmuş olduğu akülerden faydalanacaktır. Bu sebeple çamaşır makinesi ve fırın gibi yüksek güç tüketimli cihazların gündüz kullanılması önerilmektedir. Tasarımı yapılan bu sistem 2 gün güneş enerjisinden faydalanmasa bile yayla evinin enerji ihtiyacını karşılayabilecektir. Gündüz saatlerinde havanın bulutlu olduğu durumlarda bile güneş panellerinin belirli bir değerde enerji üretimini sürdüreceği unutulmamalıdır.

Ulusal şebeke bağlantısının olmadığı bir bölge için tasarımı yapılan bu sistemde, kurulumu düşünülen şebekeden bağımsız sabit sistemin ekipmanlarının piyasa fiyatları araştırılarak sistemin kurulum maliyeti 113400 ₺ olarak hesaplanmıştır. Yıl boyunca yaylalarda kalıp hayvancılıkla uğraşan bu insanlar, teknolojik açıdan gündelik alışkanlıklarına devam edebilmeleri için elektrik enerjisine ihtiyaç duymaktadırlar. Bu sebeple şebekeden bağımsız fotovoltaik elektrik üretim sistemleri, ulusal şebeke ağının olmadığı kırsal alanlar için bir seçenek olarak ortaya çıkmaktadır. Sistem ekipmanlarının performans ve kullanım ömürleri dikkate alındığında yaylalarda hayvancılıkla uğraşan kişiler için sistemin ilk yatırım maliyeti oldukça makul görülmektedir.

KAYNAKÇA

Adeyemo, A. A., & Amusan, O. T. (2022). Modelling and multi-objective optimization of hybrid energy storage solution for photovoltaic powered off-grid net zero energy building. *Journal of Energy Storage, 55*, 105273.

Alkan, S., Öztürk, A., Zavrak, S., Tosun, S., & Avcı, E. (2014, Kasım). Bir evin elektrik enerjisi ihtiyacını karşılayacak fotovoltaik sistemin kurulumu. Eleco 2014 Elektrik – Elektronik – Bilgisayar ve Biyomedikal Mühendisliği Sempozyumu, Bursa.

Anonim, 2024. Simav'ın Coğrafi Konumu, http://simav.gov.tr/ilcemizin-tarihcesi, (Son erişim tarihi: 14.10.2024).

Akgül, B. A., Cinkılıç M.E., Yeğingil, İ. (2021). Design and Modeling a Off-Grid Photovoltaic System to Meet the Electrical Energy Requırement of a House in Gaziantep Region, Performing Technical Analysis and Basic Simulation. *Euroasia Journal of Mathematics, Engineering, Natural & Medical Sciences, 8*(14), 145-159

Jamroen, C., & Vongkoon, P. (2023). The role of state-of-charge management in optimal techno-economic battery energy storage sizing for off-grid residential photovoltaic systems. *Journal of Energy Storage, 72,* 108246.

Cho, D., & Valenzuela, J. (2019). Scheduling energy consumption for residential stand-alone photovoltaic systems. Solar Energy, 187, 393-403.

Díaz, P., Arias, C. A., Peña, R., & Sandoval, D. (2010). FAR from the grid: A rural electrification field study. *Renewable Energy, 35*(12), 2829-2834.

Díaz, P., Peña, R., Muñoz, J., Arias, C. A., & Sandoval, D. (2011). Field analysis of solar PV-based collective systems for rural electrification. Energy, 36(5), 2509-2516.

EİGM. Enerji İşleri Genel Müdürlüğü, Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası (GEPA), https://gepa.enerji.gov.tr/MyCalculator. Erişim tarihi: 21.12.2024a

EİGM. Enerji İşleri Genel Müdürlüğü, Kütahya İli Güneş Enerjisi Potansiyeli Haritası, https://gepa.enerji.gov.tr/MyCalculator/ pages/43.aspx. Erişim tarihi: 20.12.2024b

Fu, F. Y., Alharthi, M., Bhatti, Z., Sun, L., Rasul, F., Hanif, I., & Iqbal, W. (2021). The dynamic role of energy security, energy equity and environmental sustainability in the dilemma of emission reduction and economic growth. *Journal of Environmental Management, 280*, 111828.

Ijumba N.M., Wekesah C.W. Application potential of solar and mini-hydro energy sources in rural electrification. In: 1996, IEEE AFRICON 4th AFRICON; 1996

Joshi, A. S., Dincer, I., & Reddy, B. V. (2009). Performance analysis of photovoltaic systems: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13*(8), 1884-1897.

PwC Enerji, Türkiye ve Dünyada Güneş Enerjisi Sektörü, Aralık 2021 Raporu.

Hemmati, R., Mehrjerdi, H., & Bornapour, M. (2020). Hybrid hydrogen-battery storage to smooth solar energy volatility and energy arbitrage considering uncertain electrical-thermal loads. *Renewable Energy, 154,* 1180-1187.

Khezri, R., Mahmoudi, A., & Aki, H. (2022). Optimal planning of solar photovoltaic and battery storage systems for grid-connected residential sector: Review, challenges and new perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 153,* 111763.

Akikur, R. K., Saidur, R., Ping, H. W., & Ullah, K. R. (2013). Comparative study of stand-alone and hybrid solar energy systems suitable for off-grid rural electrification: *A review. Renewable and sustainable energy reviews, 27*, 738-752.

TEİAŞ. Türkiye Elektrik İletim A.Ş. Kurulu Güç Raporları, Erişim Adresi: https://ytbsbilgi.teias.gov.tr/ytbsbilgi/frm_istatistikler.jsf. Erişim tarihi: 20.11.2024.

URL-1. Elektrik yükü hesaplayıcısı (Çevrimiçi). https://www.ke.com.pk/sustainability/energy-conservation/ec-calculator/ Erişim tarihi 10.10.2024.

URL-2. Elektrik yükü hesaplayıcısı (Çevrimiçi). https://ckbogazici.com.tr/tr/tuketim-hesaplama, Erişim tarihi 10.10.2024.

URL-3. Panel Kataloğu, https://www.gazioglusolar.com.tr/pdf/GSE_HC_360-375W.pdf, Erişim Tarihi, 15.10.2024.

URL-4. Akü Kataloğu, https://www.orbussolar.com/files/urunler/ORBUS_GEL_12V_200_AH.pdf, Erişim Tarihi 15.10.2024.

URL-5. İnverter Kataloğu, https://www.toggo.com.tr/wp-content/uploads/2024/05/HV6_2-11K.pdf, Erişim Tarihi 15.10.2024.

URL-6. Akü Fiyatı, https://www.solarsanalmarket.com/urun/orbus-200-amper-jel-aku, Erişim tarihi 25.10.2024.

URL-7. Monokristal Panel Fiyatı, https://www.argefen.com/marka/gazioglu-solar, Erişim Tarihi 25.10.2024.

URL-8. İnverter Fiyatı, https://enerjimar.com/lexron-24v-3kw-hv-mppt-40-500-pv-input-akilli-invertor Erişim Tarihi 25.10.2024

URL-9. Solar Kablo Fiyatı, https://solarevi.com/solar-kablo, Erişim Tarihi 25.10.2024

URL-10. Solar MC4 Konnektör Fiyatı (3'lü paralellere), https://www.ekonomiksolar.com/urun-kategori/baglanti-ekipmanlari/solar-konnektor/ Erişim Tarihi 25.10.2024.

URL-11. Solar MC4 Konnektör Fiyatı (Tekli), https://www.ekonomiksolar.com/urun-kategori/baglanti-ekipmanlari/solar-konnektor/ Erişim Tarihi 25.10.2024

URL-12. Üçgen Ayak Fiyatı, https://enerjimar.com/solar-panel-ucgen-hafif-ayak, Erişim tarihi 25.10.2024.

URL-13. Kiremit Çatı Montaj Seti Fiyatı, https://www.teknovasyonarge.com/kategori/hazir-set-konstruksiyonlar Erişim Tarihi 25.10.2024

Yalılı Kılıç, M., & Adalı, S. (2023). Güneş enerjisi kullanarak bir villanın elektrik ihtiyacının karşılanması. *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, *28*(1), 121-130.

Wang, Y., Kazemi, M., Nojavan, S., & Jermsittiparsert, K. (2020). Robust design of off-grid solar-powered charging station for hydrogen and electric vehicles via robust optimization approach. *International Journal of Hydrogen Energy*, *45*(38), 18995-19006.

Zhi, Y., & Yang, X. (2023). Scenario-based multi-objective optimization strategy for rural PV-battery systems. *Applied Energy*, *345*, 121314.

Zenk, H. (2018). Yayla evlerinin optimum enerji ihtiyacının fotovoltaik sistemler kullanılarak düşük maliyetle karşılanması. *Turkish Journal of Agriculture-Food Science and Technology*, *6*(12), 1768-1774.



Modern Mühendislik Uygulamaları ve Gelecek Perspektifleri: Makine Mühendisliği ve Yapay Zekâ

Cebeli Özek[1]

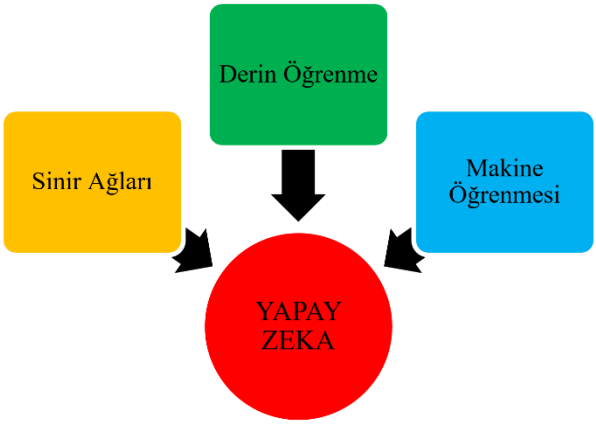
[1] Prof. Dr., Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0001-7603-415X

Giriş

Yapay Zeka makinelere insan gibi düşünme, algılama ve problem çözme yetenekleri kazandırmaya çalışan ve bu yetenekler kazandırılırken bu alanda bilgisayar sistemleri, robotlar gibi öğelere insani zeka gerektiren durumlarda Konuşma ve doğal dil işleme becerisi, Görüntü ve ses tanıma, Makine öğrenmesi, Problem çözme ve Karar verme şeklinde yetenekler olarak sıralanabilirler. Bu yetenekleri öğelere kazandırmak için karmaşık algoritma ve modelleri geliştirme, yazılım ve donanım bileşenlerini entegre bir biçimde kullanma, ciddi seviyedeki veriler ile makinenin eğitilmesi gibi konularda mühendislik bilgisi kullanılmaktadır. Bütün bunlar yapay zeka mühendisleri tarafından yapılmaktadır. Yapay zeka mühendisleri ilk önce algoritmalar geliştirir, verileri toplar, toplanan verileri makinalara eğitir, eğitilen verileri test ederek yazılım geliştirir ve son olarak ilgili ürünün içerisine farklı diller arasında çeviri yapabilecek kodları yazarak yazılım geliştirme sürecinde yapay zeka için aktif rol oynarlar.

Örneğin, yapay zeka mühendisleri bir ses tanıma sistemi geliştirerek telefonlardaki sesli asistanları yapıp bu sistemi yapay zeka mühendisliği ile oluşturarak kullanıma sundular.

Bir başka örnek ile bir robota bir dişli çark ile bir vidayı ayırt etmeyi öğreteceksek, bunun için bir veri kümesi olarak dişli çark ve vida resimlerini ve birde özelliklerini ayrı ayrı robota göstererek tanımlayacağız. Robot bu resimlere bakarak dişli çark nasıldır, vida nasıldır şeklinde çıkarımlar yapacak ve sonuç olarak doğru sonucu çıkarmaya yoğunlaşacaktır. Aşağıda Şekil 1'de yapay zeka ve ürün arasındaki bağlantı ifade edilmiştir.



Şekil 1. Yapay Zeka ve Ürün Arasındaki Bağlantı

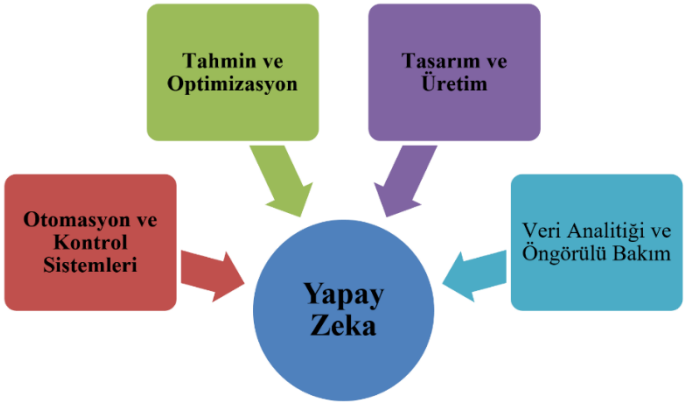
Endüstri 4.0, üretim sektöründe dijital dönüşümün öncülüğünü yapmaktadır (Gülseren & Sağbaş, 2019). Yenilikçi teknolojilerin kullanımıyla birlikte, üretim süreçlerinin daha verimli hale gelmesi, esnek üretim sistemlerinin oluşturulması ve müşteri taleplerine daha hızlı yanıt verilmesi gibi önemli özelliklere sahiptir. Ayrıca, cihazlar arasındaki iletişim sayesinde otomatikleştirilmiş üretim süreçleriyle insan müdahalesinin azaltılması mümkün olmaktadır. Endüstri 4.0, üretim süreçlerindeki verimliliği artırırken, makineler arasındaki iletişimi güçlendirerek daha akıllı sistemlerin geliştirilmesine olanak tanımaktadır (Bağcı, 2018).

Makine mühendisliği, en köklü ve geniş mühendislik disiplinlerinden biridir (Aksungur & Koca, 2018). Makine mühendisliği, fizik ve matematik ilkelerini kullanarak mekanik sistemlerin tasarımı, analizi, üretimi ve bakımı ile ilgilenen bir mühendislik da dalıdır (Özbilek, 2023). Bu alan, otomotiv, havacılık, enerji, imalat ve daha birçok sektörde kritik öneme sahiptir. Son yıllarda, yapay zeka teknolojilerinin hızla gelişmesiyle birlikte, makine mühendisliği de bu yenilikçi yaklaşımlardan büyük ölçüde etkilenmiş ve dönüşüm geçirmiştir (Edgar & Pistikopoulos, 2018; Malik vd., 2024). Yapay zeka, mühendislik problemlerinin çözümünde yeni yöntemler sunmakta ve daha verimli, akıllı sistemlerin geliştirilmesine olanak tanımaktadır (Bahiraei, vd., 2019). Bu iki alanın kesişimi, endüstri ve teknoloji dünyasında devrim yaratmıştır (Yang & Su, 2021). Yapay zeka, makinelerin kendi başına öğrenme, karar verme ve problem çözme yeteneklerinin oluşturulmasıyla ilgilenirken, makine mühendisliği de bu teknolojilerin fiziksel sistemlerle etkileşimi ve entegrasyonu konusunda çalışmaktadır. Bu sayede, Endüstri 4.0 döneminde yapay zeka ve makine mühendisliği birlikte çalışarak üretim süreçlerinde önemli gelişmelerin sağlanmasına olanak tanımaktadır. Bu bölümde, makine mühendisliği ve yapay zeka arasındaki ilişki, uygulama alanları ve gelecekteki potansiyel gelişmeler incelenmektedir.

Yapay Zeka ve Makine Mühendisliği Arasındaki İlişki

Yapay zeka ve makine mühendisliği arasındaki ilişki, modern teknolojinin gelişiminde büyük bir rol oynamaktadır. Makine mühendisliği, mekanik sistemlerin tasarımı, analizi, üretimi ve bakımı ile ilgilenen bir mühendislik disiplinidir (Özbilek, 2023). Bu alan, otomotivden robotik sistemlere kadar geniş bir uygulama yelpazesine sahiptir. Yapay zeka ise robotlar ve otomatik sistemlere zeka katmanı ekleyerek daha akıllı ve özerk hale getirir (Kablan, 2018). Örneğin, bir endüstriyel robot, yapay zeka ile donatıldığında daha karmaşık görevleri yerine getirebilir ve çevresine uyum sağlayabilir. Makine mühendisliği, çeşitli sensörlerin entegre edilmesini sağlar. Yapay zeka, bu sensörlerden gelen verileri analiz ederek makinelerin daha bilinçli kararlar almasına yardımcı olur (Tutar vd., 2018). Örneğin, bir otonom araç, sensörlerden gelen verileri yapay zeka algoritmaları ile işleyerek

güvenli bir şekilde seyahat edebilir. Yapay zeka, makine mühendislerinin daha verimli tasarımlar yapmasına yardımcı olabilir. Makine öğrenimi algoritmaları, tasarım optimizasyonu için kullanılabilir ve mühendislik süreçlerini hızlandırabilir. Bu alanlar arasındaki etkileşim, teknolojinin sınırlarını zorlayarak daha gelişmiş ve akıllı sistemlerin ortaya çıkmasını sağlar. Yapay zeka ve makine mühendisliği arasındaki ilişki Şekil 2'de görüldüğü gibi dört başlık altında açıklanabilir.



Şekil 2. Yapay Zeka ve Makine Mühendisliği Arasındaki İlişki

1. **Otomasyon ve Kontrol Sistemleri:** Makine mühendisliğinin en önemli alanlarından biri olan otomasyon ve kontrol sistemleri, yapay zekanın entegrasyonu ile daha akıllı ve esnek hale gelmektedir (Yüksel & Börklü, 2021). Geleneksel otomasyon sistemleri, belirli programlara dayalı olarak çalışırken, yapay zeka tabanlı sistemler veri analizi ve öğrenme yetenekleri sayesinde dinamik koşullara uyum sağlayabilir. Bu sayede endüstriyel robotların ve üretim hatlarının daha verimli ve esnek çalışmasını sağlar. Örneğin, makine öğrenimi algoritmaları, robotların belirli görevleri daha hızlı ve hassas bir şekilde gerçekleştirmesine yardımcı olarak üretim süreçlerinde önemli iyileştirmeler sağlar ve verimliliği artırır.

2. **Tahmin ve Optimizasyon:** Yapay zeka teknikleri, karmaşık mühendislik problemlerinin çözümünde tahmin ve optimizasyon yapabilmektedir (Moradi, vd., 2023). Makine mühendisliğinde, enerji verimliliği, malzeme seçimi, üretim süreçleri ve bakım planlaması gibi konular hayati öneme sahiptir. Yapay zeka, büyük veri analitiği ve optimizasyon algoritmaları kullanarak bu süreçlerin daha verimli yönetilmesine olanak tanır (Li, Ju, & Wang, 2024). Örneğin, yapay zeka destekli tahmin sistemleri, bir makinenin arıza yapma olasılığını öngörebilir ve böylece planlı bakım yapılmasını sağlar. Bu sayede hem maliyetleri düşürülüp hem de operasyonel kesintiler en aza indirilmiş olur.

Ayrıca, yapay zeka enerji verimliliğini artırmak için üretim süreçlerini optimize ederken, kaynakların daha etkin kullanılmasına katkıda bulunur.

3. **Tasarım ve Üretim:** Yapay zekanın tasarım süreçlerine entegrasyonu, mühendislerin daha yaratıcı ve verimli tasarımlar yapmasına yardımcı olur (Álvaro, & Barreda, 2025). Yapay zeka destekli tasarım (AID - AI-assisted Design) araçları, mühendislerin karmaşık geometriler ve optimizasyon problemleri üzerinde çalışmasını kolaylaştırır (Cui, vd., 2023; Lv, vd., 2024). Bu araçlar, çeşitli tasarım parametrelerini analiz ederek en uygun tasarım çözümlerini önerir. Ayrıca, yapay zeka tabanlı kalite kontrol sistemleri, üretim süreçlerinde hataların tespit edilmesini ve giderilmesini hızlandırır (Soori, vd., 2024). Örneğin, bilgisayar görmesi (CV) algoritmaları, üretim hattında üretilen parçaların kalitesini anlık olarak kontrol edebilir ve hatalı parçaları tespit edebilir. Böylece üretim süreçlerinin daha verimli ve hatasız yürütülmesi sağlanır.

4. **Veri Analitiği ve Predictive Maintenance:** Yapay zeka, büyük veri analitiği ve öngörülü bakım (predictive maintenance) alanlarında da önemli rol oynamaktadır (Zonta vd., 2020; Stohr, vd., 2024). Makine mühendisliği, genellikle büyük miktarda verinin toplandığı ve analiz edildiği bir alandır. Yapay zeka, bu verilerin analiz edilmesi ve anlamlı bilgiye dönüştürülmesi sürecinde kullanılır (Lee, vd., 2019; Ayvaz, & Alpay, 2021). Öngörülü bakım, makinelerin arızalanmadan önce bakım ihtiyacını belirlemeyi amaçlayan bir yaklaşımdır (Kurtulus, vd., 2020). Yapay zeka algoritmaları, makine verilerini analiz ederek potansiyel arızaları öngörebilir ve böylece bakım işlemleri zamanında gerçekleştirilebilir. Bu sayede, bakım maliyetleri azaltılırken, makinelerin çalışma sürekliliğini artırılmış olur (Abbassi, vd., 2022).

Uygulama Alanları

Yapay zeka ve makine mühendisliği disiplinlerinin nasıl birlikte çalıştığı ve hangi alanlarda önemli katkılar sağladığı Şekil 3 özetlenmiştir.



Şekil 3. Makine Mühendisliği ve Yapay Zekâ Uygulama Alanları

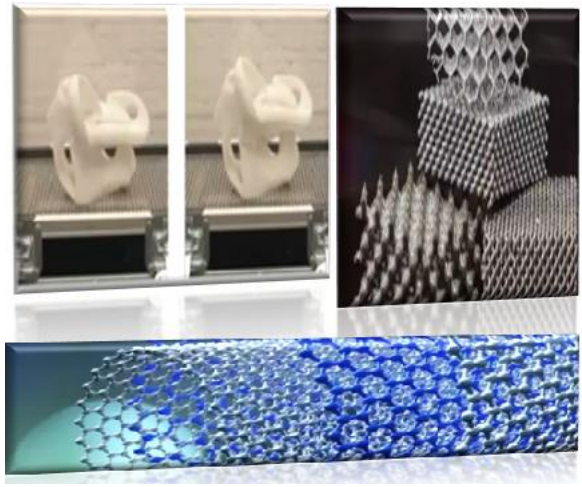
Yapay zeka ve makine mühendisliği disiplinlerinin iş birliği, yalnızca mevcut sistemleri iyileştirmekle kalmayıp aynı zamanda yeni ve yenilikçi çözümler üretmektedir. Yapay zeka ve makine mühendisliğinin birlikte çalışması, endüstriyel verimliliği artırarak daha akıllı, güvenli ve sürdürülebilir bir gelecek yaratmada kritik bir rol oynamaktadır (Yıldız, 2018).

1. **Robotik ve Otomasyon:** Yapay zekanın makine mühendisliğine en büyük katkılarından biri, robotik ve otomasyon sistemlerinde görülmektedir (El-Gharib, & Amyot, 2023). Makine mühendisleri, robotların mekanik ve elektriksel bileşenlerini tasarlar ve üretirken yapay zeka bu robotlara akıllı özellikler ekleyerek onları daha özerk ve esnek hale getirir. Otonom robotlar, endüstriyel süreçlerin yanı sıra günlük yaşamda da giderek daha fazla kullanılmaktadır (Şekil 4). Üretim hatlarında kullanılan robotlar, yapay zeka algoritmaları sayesinde daha karmaşık görevleri yerine getirebilir ve insan-robot etkileşimini iyileştirebilir (Tsutsumi, Kovács, & Szalóki, 2022). Otonom araçlar ise, yapay zeka destekli sensörler ve veri analitiği ile çevresel koşullara uyum sağlayarak güvenli ve verimli ulaşım sağlar (Akhunzada, vd., 2024). Bu sayede üretim süreçlerinde iş güvenliğini artırılıp operasyonel verimlilik iyileştirilebilir (Ribeiro, vd., 2021).



Şekil 4. Otonom Robotlar

2. Akıllı Malzemeler: Makine mühendisliğinde kullanılan malzemelerin özelliklerini optimize etmek için yapay zeka teknikleri kullanılmaktadır (Verma, & Khanna, 2023). Akıllı malzemeler, belirli dış uyaranlara (örneğin sıcaklık, basınç, manyetik alan) tepki veren ve özelliklerini değiştiren malzemelerdir (Toker, 2020). Örneğin Şekil 5'de görülen akıllı malzemeler fiziksel veya kimyasal tepkilerle ortam veya koşullara uyum sağlayabilirler ve temel özellikleri şekil hafızası etkisidir. Yani belirli bir formda şekillendirildikten sonra ısının veya diğer uyarıcıların etkisiyle geçici olarak deformasyona uğrayıp tekrar eski şeklini geri kazanabilirler. Bu şekil hafızası etkisi, biyomedikal cihazlar, mikroelektronik mekanik sistemler, otomotiv endüstrisi gibi çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır. Yapay zeka, bu malzemelerin davranışlarını modellemek ve optimize etmek için kullanılabilir. Yapay zekâ destekli simülasyonlar, akıllı malzemelerin belirli koşullar altında nasıl davranacağını tahmin edebilir ve bu bilgiler malzeme tasarım süreçlerinde kullanılabilir (Firoozi, & Firoozi, 2024). Bu sayede, daha dayanıklı, esnek ve verimli malzemeler geliştirilebilir.



Şekil 5. Akıllı Malzemeler

3. Enerji Sistemleri: Enerji sistemleri, modern toplumların vazgeçilmez bir parçasıdır ve bu sistemlerin verimli bir şekilde yönetilmesi büyük önem taşımaktadır (Kaya, Ercan, 2023). Yapay zeka, enerji sistemlerinde talep tahmini, enerji optimizasyonu ve akıllı şebeke yönetimi gibi alanlarda önemli katkılar sağlamaktadır (Göde, Doğan & Özköse, 2023; Ur Rehman, vd., 2023). Örneğin, Şekil 6'de görüldüğü gibi yapay zeka destekli enerji yönetim sistemleri, enerji talebini tahmin ederek enerji üretim ve dağıtım süreçlerini optimize edebilir (Sen, vd., 2023). Böylece enerji israfının azaltılarak enerji verimliliğini artırılmasına katkıda bulunmaktadır. Ayrıca, yapay zeka tabanlı akıllı şebeke sistemleri, enerji tüketimini gerçek zamanlı olarak izleyebilir ve optimize edebilir, bu sayede enerji kaynaklarının daha verimli kullanılmasını sağlar (Qamar, Guo, & Ahmad, 2024). Bu durum, çevresel sürdürülebilirlik açısından da önemli katkılar sunmaktadır.



Şekil 6. Yapay zeka destekli enerji yönetim sistemleri

4. Sağlık ve Tıp: Makine mühendisliği ve yapay zeka, sağlık ve tıp alanında da önemli yenilikler sunmaktadır. Özellikle robotik cerrahi sistemler ve tıbbi cihazların tasarımı, bu iki disiplinin birleşimi ile büyük ilerlemeler kaydetmektedir (Shah, Nasir, & Parvaiz, 2020; Biswas, Sikander, & Kulkarni, 2023). Yapay zeka destekli robotik cerrahi sistemler, cerrahların daha hassas ve güvenli operasyonlar gerçekleştirmesine olanak tanımaktadır (Şekil 7). Ayrıca, yapay zeka tabanlı tıbbi cihazlar, hastalıkların erken teşhisi ve tedavi süreçlerinin iyileştirilmesi için kullanılabilir (Khanna, & Shah, 2024). Yapay zeka algoritmaları, tıbbi görüntüleme verilerini analiz ederek hastalık belirtilerini erken aşamalarda tespit ederek tedavi süreçlerinin daha etkili ve zamanında yapılmasını sağlayabilir.



Şekil 7. Yapay zeka destekli robotik cerrahi sistemler

5. İmalat ve Üretim: Yapay zeka, imalat ve üretim süreçlerinde de geniş bir uygulama yelpazesi sunmaktadır (Heiden, vd, 2021). Üretim hatlarının optimizasyonu, kalite kontrol, envanter yönetimi ve üretim planlaması gibi alanlarda yapay zeka kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır (Özek, Çaydaş, & Ünal, 2012; Alfred, vd., 2024). Bilgisayar destekli üretim (CAM) sistemleri, üretim süreçlerinin otomatikleştirilmesini ve optimize edilmesi (Özek, Ünal, Özek, 2006) örnek olarak verilebilir. Ayrıca, yapay zeka tabanlı kalite kontrol sistemleri, üretim hatlarında üretilen parçaların kalitesini anlık olarak kontrol edebilir ve hatalı parçaları tespit edebilir (Akundi & Reyna, 2021). Bu, üretim süreçlerinin daha verimli ve hatasız yürütülmesine katkı sağlar (Heredia, & Barreda, 2024). Şekil 8'de yapay zekanın imalat ve üretim süreçlerindeki bazı önemli uygulama alanları için örnekler verilmiştir.



Şekil 8. Yapay zekanın imalat ve üretim süreçlerindeki bazı önemli uygulama alanları

6. İnşaat ve Altyapı: Makine mühendisliği ve yapay zeka, inşaat ve altyapı projelerinde de önemli rol oynamaktadır. Yapay zeka, bina tasarımı, yapı malzemelerinin optimizasyonu, inşaat süreçlerinin planlanması ve yönetimi gibi alanlarda kullanılabilir (Geyer, Singh, & Chen, 2021). Örneğin, yapay zeka destekli bina bilgi modellemesi (BIM) araçları, inşaat projelerinin daha verimli ve koordineli bir şekilde yönetilmesini sağlamaktadır (Kazemi, Entezami, & Ghisi, 2024). Ayrıca, yapay zeka tabanlı sensörler ve veri analitiği, yapıların sağlık izleme ve bakım süreçlerinde kullanılabilir (Shen, vd., 2017). Bu, yapıların daha dayanıklı ve güvenli olmasını sağlayacaktır. Aşağıda Şekil 9'da yapay zekânın inşaat ve altyapı projelerinde sağladığı katkıları ifade eden süreçler verilmiştir.



Şekil 9. Yapay zekânın inşaat ve altyapı projelerinde sağladığı katkılar

Gelecek Perspektifleri

Yapay zeka ve makine mühendisliği kombinasyonu, gelecekte daha gelişmiş ve verimli mühendislik çözümlerinin yolunu açacaktır. Bu entegrasyon, sürdürülebilir teknolojilerin geliştirilmesi, endüstriyel süreçlerin iyileştirilmesi ve daha yenilikçi ürünlerin tasarımı için önemli fırsatlar sunmaktadır (Sarnıç, & Özutku, 2024). Akıllı üretim teknikleri, esnek ve özelleştirilebilir üretim hatları, enerji verimliliği ve sürdürülebilirlik gibi alanlarda büyük potansiyel barındırmaktadır. Endüstri 4.0'ın temel taşlarını oluşturan bu entegrasyon, gelecekte daha akıllı ve verimli sistemler yaratmanın anahtarı olacaktır (Yıldız, 2018). Örneğin, akıllı şehirler konsepti, yapay zeka ve makine mühendisliği teknolojilerinin birleşimi ile hayata geçirilebilir. Akıllı ulaşım sistemleri, enerji yönetim sistemleri ve altyapı çözümleri, şehirlerin daha verimli ve sürdürülebilir bir şekilde yönetilmesini sağlamaktadır.

Bunun yanı sıra, yapay zeka ve makine mühendisliği, sağlık alanında da önemli yenilikler sunmaktadır (Biswas, Sikander & Kulkarni, 2023). Özellikle robotik cerrahi sistemler ve tıbbi cihazların tasarımı, bu iki disiplinin birleşimi ile büyük ilerlemeler kaydetmektedir (Ma, vd., 2023). Yapay zeka destekli robotik cerrahi sistemler, cerrahların daha hassas ve güvenli operasyonlar gerçekleştirmesine olanak tanımaktadır (Gupta, & Jha, 2024). Ayrıca, yapay zekatabanlı tıbbi cihazlar, hastalıkların erken teşhisi ve tedavi süreçlerinin iyileştirilmesi için kullanılabilir (Liu, Rong, & Peng, 2020).

Sonuç

Modern mühendislik uygulamaları, özellikle makine mühendisliği alanında, yapay zekânın entegrasyonu ile önemli bir dönüşüm sürecine girmiştir. Yapay zeka, mühendislik süreçlerini optimize etmekte ve daha verimli çözümler sunmaktadır. Bu bağlamda, makine mühendisleri yapay zeka teknolojilerini kullanarak tasarım aşamalarından üretim süreçlerine kadar birçok alanda yenilikçi yaklaşımlar geliştirmektedir.

Gelecek perspektifleri incelendiğinde, yapay zekanın makine mühendisliğinde daha fazla yer bulacağı öngörülmektedir. Otomasyon sistemleri ve akıllı robotlar gibi uygulamalar, üretim hatlarının verimliliğini artırmakta ve insan hatalarını minimize etmektedir. Ayrıca, veri analitiği sayesinde mühendisler, karmaşık sistemlerin performansını daha iyi anlayabilmekte ve bu doğrultuda iyileştirmeler gerçekleştirebilmektedir.

Sonuç olarak, makine mühendisliği ile yapay zekâ arasındaki etkileşim gelecekteki mühendislik uygulamalarının şekillenmesinde kritik bir rol oynamaktadır. Bu gelişmelerin sektördeki yenilikçi çözümlerle birleşmesi, hem endüstriyel verimliliği artıracak hem de sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşılmasına katkıda bulunacaktır.

Kaynaklar

Abbassi, R., Arzaghi, E., Yazdi, M., Aryai, V., Garaniya, V., & Rahnamayiezekavat, P. (2022). Risk-based and predictive maintenance planning of engineering infrastructure: existing quantitative techniques and future directions. *Process Safety and Environmental Protection*, *165*, 776-790.

Akhunzada, A., Al-Shamayleh, A. S., Zeadally, S., Almogren, A., & Abu-Shareha, A. A. (2024). Design and performance of an AI-enabled threat intelligence framework for IoT-enabled autonomous vehicles. *Computers and Electrical Engineering*, *119*, 109609.

Aksungur, S., & Koca, T. (2018). Fütürizm akımı bağlamında makine mühendisliğinin geleceği. *Mesleki Bilimler Dergisi (MBD)*, *7*(2), 187-196.

Akundi, A., & Reyna, M. (2021). A machine vision based automated quality control system for product dimensional analysis. *Procedia Computer Science*, *185*, 127-134.

Alfred, R., Chinthamu, N., Jayanthy, T., Muniyandy, E., Dhiman, T. K., & John, T. N. (2024). Implementation of advanced techniques in production and manufacturing sectors through support vector machine algorithm with embedded system. *Measurement: Sensors*, *33*, 101119.

Álvaro, J. A. H., & Barreda, J. G. (2025). An advanced retrieval-augmented generation system for manufacturing quality control. *Advanced Engineering Informatics*, *64*, 103007.

Ayvaz, S., & Alpay, K. (2021). Predictive maintenance system for production lines in manufacturing: A machine learning approach using IoT data in real-time. *Expert Systems with Applications*, *173*, 114598.

Bağcı, E. (2018). Endüstri 4.0: Yeni üretim tarzını anlamak. *Gümüşhane Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, *9*(24), 122-146.

Bahiraei, M., Heshmatian, S., & Moayedi, H. (2019). Artificial intelligence in the field of nanofluids: A review on applications and potential future directions. *Powder Technology*, *353*, 276-301.

Biswas, P., Sikander, S., & Kulkarni, P. (2023). Recent advances in robot-assisted surgical systems. *Biomedical Engineering Advances*, 100109.

Cui, H., Guo, Y., Xiao, Y., Wang, Y., Li, J., Zhang, Y., & Zhang, H. (2023). Enhanced Harris Hawks Optimization Integrated with Coot Bird Optimization for Solving Continuous Numerical Optimization Problems. *CMES-Computer Modeling in Engineering & Sciences*, *137*(2).

Edgar, T. F., & Pistikopoulos, E. N. (2018). Smart manufacturing and energy systems. *Computers & Chemical Engineering*, *114*, 130-144.

El-Gharib, N. M., & Amyot, D. (2023). Robotic process automation using process mining—A systematic literature review. *Data & Knowledge Engineering*, 102229.

Firoozi, A. A., & Firoozi, A. A. (2024). Emerging Trends in Damage Tolerance Assessment: A Review of Smart Materials and Self-Repairable Structures. *Structural Durability & Health Monitoring (SDHM)*, *18*(1).

Geyer, P., Singh, M. M., & Chen, X. (2021). Explainable AI for engineering design: A unified approach of systems engineering and component-based deep learning. *Available at SSRN 4833100*.

Göde, A., Doğan, A., & Özköse, H. (2023). Enerji Sektörünün Dijital Dönüşümünde Yapay Zekâ. *Yönetim Bilişim Sistemleri İşletmelerde Dijital*, 163.

Gupta, N., & Jha, R. (2024). Artificial intelligence (AI) in medical robotics. In *Advances in Artificial Intelligence* (pp. 141-167). Academic Press.

Gülseren, A., & Sağbaş, A. (2019). Endüstri 4.0 perspektifinde sanayide dijital dönüşüm ve dijital olgunluk seviyesinin değerlendirilmesi. *European Journal of Engineering and Applied Sciences*, *2*(2), 1-5.

Heiden, B., Alieksieiev, V., Volk, M., & Tonino-Heiden, B. (2021). Framing artificial intelligence (AI) additive manufacturing (AM). *Procedia Computer Science*, *186*, 387-394.

Heredia, J. A., & Barreda, J. G. (2024). An advanced retrieval-augmented generation system for manufacturing quality control. *Available at SSRN 4828863*.

Kablan, A. (2018). Endüstri 4.0, "Nesnelerin İnterneti"-Akıllı İşletmeler Ve Muhasebe Denetimi. *Süleyman Demirel Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, *23* (Endüstri 4.0 ve Örgütsel Değişim Özel Sayısı), 1561-1579.

Kaya, K., & Ercan, M. (2023). Enerji Arz Ve Güvenliği: Enerji Krizinin Batı'ya Ve Türkiye'ye Etkileri. *Uluslararası Küresel Güvenlik Sorunları*, 65.

Kazemi, P., Entezami, A., & Ghisi, A. (2024). Machine learning techniques for diagrid building design: Architectural–Structural correlations with feature selection and data augmentation. *Journal of Building Engineering*, *86*, 108766.

Khanna, R., & Shah, E. (2024). Robotics in Screening, diagnosis and treatment of breast Cancer: a perspective view. *Clinical Breast Cancer*, *24*(1), 17-26.

Kurtulus, M., Irgi, F., Namdar, M., Basgumus, A., & Temirtas, R. (2020, October). Internet of things based predictive mechanical fault detection system. In *2020 4th International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT)* (pp. 1-7). IEEE.

Lee, W. J., Wu, H., Yun, H., Kim, H., Jun, M. B., & Sutherland, J. W. (2019). Predictive maintenance of machine tool systems using artificial intelligence techniques applied to machine condition data. *Procedia Cirp*, *80*, 506-511.

Li, L., Ju, Y., & Wang, Z. (2024). Quantifying the impact of building load forecasts on optimizing energy storage systems. *Energy and Buildings*, *307*, 113913.

Liu, R., Rong, Y., & Peng, Z. (2020). A review of medical artificial intelligence. *Global Health Journal*, *4*(2), 42-45.

Lv, M., Wang, J., Wang, S., Zhao, Y., Gao, J., & Wang, K. (2024). A multi-input and dual-output wind speed interval forecasting system based on constrained multi-objective optimization problem and model averaging. *Energy Conversion and Management*, *319*, 118909.

Ma, S., Li, L., Yang, C., Liu, B., Zhang, X., Liao, T., ... & Guo, T. (2023). Advances in the application of robotic surgical systems to gastric cancer: A narrative review. *Asian Journal of Surgery*, *46*(8), 3027-3032.

Malik, S., Muhammad, K., & Waheed, Y. (2024). Artificial intelligence and industrial applications-A revolution in modern industries. *Ain Shams Engineering Journal*, 102886.

Moradi, S., Omar, A., Zhou, Z., Agostino, A., Gandomkar, Z., Bustamante, H., ... & Leslie, G. (2023). Forecasting and optimizing dual media filter performance via machine learning. *Water Research*, *235*, 119874.

Özbilek, İ. B. (2023). Afetlerde Mühendislik Hizmetleri. *İzmir Katip Çelebi Üniversitesi Sağlık Bilimleri Fakültesi Dergisi*, *8*(2), 809-816.

Özek, C., Çaydaş, U., & Ünal, E. (2012). A fuzzy model for predicting surface roughness in plasma arc cutting of AISI 4140 steel. *Materials and Manufacturing Processes*, *27*(1), 95-102.

Özek, C., Ünal, E., & Özek, M. B. (2006). Zincir Dişlilerin İmalatı İçin MATLAB Programlama İle CAD-CAM CNC İntegrasyonu. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, *3*, 45-52.

Qamar, H. G. M., Guo, X., & Ahmad, F. (2024). Intelligent energy management system of hydrogen based microgrid empowered by AI optimization technique. *Renewable Energy*, *237*, 121738.

Ribeiro, J., Lima, R., Eckhardt, T., & Paiva, S. (2021). Robotic process automation and artificial intelligence in industry 4.0–a literature review. *Procedia Computer Science*, *181*, 51-58.

Sarnıç, A., & Özutku, H. (2024). Endüstri 4.0 Sürecinde İnsan Kaynakları Yetkinlikleri Üzerine Nitel Bir Araştırma. *Beykoz Akademi Dergisi*, *12*(1), 141-171.

Sen, S., Yadeo, D., Kumar, P., & Kumar, M. (2023). Machine learning and predictive control-based energy management system for smart buildings. In *Artificial Intelligence and Machine Learning in Smart City Planning* (pp. 199-220). Elsevier.

Shah, M. F., Nasir, I. I., & Parvaiz, A. (2020). Updates in robotic colorectal surgery. *Surgery (Oxford)*, *38*(1), 38-42.

Shen, L., Yan, H., Fan, H., Wu, Y., & Zhang, Y. (2017). An integrated system of text mining technique and case-based reasoning (TM-CBR) for supporting green building design. *Building and Environment*, *124*, 388-401.

Soori, M., Jough, F. K. G., Dastres, R., & Arezoo, B. (2024). AI-Based Decision Support Systems in Industry 4.0, A Review. *Journal of Economy and Technology*.

Stohr, A., Ollig, P., Keller, R., & Rieger, A. (2024). Generative mechanisms of AI implementation: A critical realist perspective on predictive maintenance. *Information and Organization*, *34*(2), 100503.

Toker, F. R. (2020). Sürdürülebilir Mimarlık Ve Akıllı Malzemeler. *Sürdürülebilir Mühendislik Uygulamaları ve Teknolojik Gelişmeler Dergisi*, *3*(2), 77-80.

Tsutsumi, D., Kovács, A., & Szalóki, Á. (2022). Novel heuristic approach to integrating task sequencing and production system configuration. *Procedia CIRP*, *107*, 28-33.

Tutar, H., Terzi, D., & Tınmaz, G. (2018). Türkiye'nin "Vizyon 2023" Stratejisi İle Almanya'nın "2025" Stratejik Hedeflerinin Endüstri 4.0 Göstergeleri İtibariyle Karşılaştırılması. *International Journal of Entrepreneurship and Management Inquiries*, 2(3), 195-212.

Ur Rehman, U., Faria, P., Gomes, L., & Vale, Z. (2023). Future of energy management systems in smart cities: A systematic literature review. *Sustainable Cities and Society*, *96*, 104720.

Verma, J., & Khanna, A. S. (2023). Digital advancements in smart materials design and multifunctional coating manufacturing. *Physics Open*, *14*, 100133.

Yang, F., & Gu, S. (2021). Industry 4.0, a revolution that requires technology and national strategies. *Complex & Intelligent Systems*, *7*, 1311-1325.

Yıldız, A. (2018). Endüstri 4.0 ve akıllı fabrikalar. *Sakarya University Journal of Science*, *22*(2), 546-556.

Yüksel, N., & Börklü, H. R. (2021). Yapay zeka destekli kavramsal tasarım: Tekerlekli sandalye tasarım seçenekleri değerlendirmede bulanık mantık kullanımı. *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi,* 7(3), 309-319.

Zonta, T., Da Costa, C. A., da Rosa Righi, R., de Lima, M. J., da Trindade, E. S., & Li, G. P. (2020). Predictive maintenance in the Industry 4.0: A systematic literature review. *Computers & Industrial Engineering*, *150*, 106889.

BÖLÜM 36

Konut Binalarında Çatı Üstü Güneş Fotovoltaik Potansiyelinin Değerlendirilmesi Üzerine Bir Araştırma

***Ahmet Uslu*[1] *& Abtullah Tuğcu*[2]**

[1] Dr. Öğr. Üyesi, Kurum Bilgisi: Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Tavşanlı Meslek Yüksekokulu, Mimarlık ve Şehir Planlama Bölümü, 43300, Tavşanlı, Türkiye, ORCID: 0000-0001-8745-423X
[2] Dr. Öğr. Üyesi, Kurum Bilgisi: Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Tavşanlı Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, 43300, Tavşanlı, Türkiye, ORCID: 0000-0001-7911-4198

1. GİRİŞ

Kentsel alanlarda artan nüfus, yoğun yüksek enerji talebini de beraberinde getirmiştir (Mrabet vd., 2019). Günümüzde kentsel ortamların nüfusu, dünya nüfusunun %50'sinden fazlasını oluşturmaktadır. Kentsel alan göçünün artması nedeniyle, bu oranın 2050 yılına kadar %70'e ulaşacağı tahmin edilmektedir. Bu, kentsel enerji tüketiminin 2030 yılına kadar tahmin edilen küresel enerji talebinin %75'ine çıkmasına yol açmaktadır (Huang vd., 2019). Güç talebindeki artış ve çevre sorunları göz önüne alındığında, temiz ve sürdürülebilir enerji çözümlerini benimseme ihtiyacı, giderek daha da önemli hale gelmiştir. Bunlar arasında güneş fotovoltaik (PV) sistemleri, güneşten temiz, bol ve tükenmez enerji sunarak umut verici bir çözüm olarak ortaya çıkmıştır (Sampaio & González, 2017). Özellikle çatı üstü güneş PV kurulumları, kentsel ortamlarda güneş enerjisinden yararlanmak, şehirlerdeki alan kullanımını optimize etmek, geleneksel fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltmak ve sonunda yeşil net sıfır enerjili binalara doğru ilerlemek için çekici bir fırsat sunmaktadır (Kuhn vd., 2021).

Çatı güneş PV'lerinin dağıtımı, özellikle net sıfır enerjili bina (NZEB) konseptine olan ilginin artmasıyla birlikte son yıllarda artmaktadır (Luthander vd., 2015). NZEB'de binalar en azından tükettikleri kadar enerji üretirler (Luthander vd., 2015). NZEB seviyelerine ulaşmak için binaların, özellikle ticari ve lüks konut binaları gibi yüksek enerji tüketen binalar için çatı PV sistemleri gibi sürdürülebilir enerji kaynakları kurmaları beklenmektedir (Allouhi vd., 2020). Binaların çatılarına güneş PV kurulumunu planlarken, optimum enerji sonuçları elde etmek için çatı gölgelerinin etkisini ve çatı eğimi ile çatı yöneliminin etkisini hesaplamak için ayrıntılı bina bilgilerine ihtiyaç duyulur (Suomalainen vd., 2017). 3B modelleme teknolojisi, binaların yüksek çözünürlüklü PV potansiyelini hesaplamak, binaların geometrisini, güneş ışınımını ve gölgelenmesini modellemek için kullanılan, daha doğru ve görsel olarak net simülasyonlar sağlayan en gelişmiş yöntemdir (Hong vd., 2017; Calcabrini vd., 2019).

Literatürdeki çalışmalar, Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) (Choi vd., 2019; Mishra vd., 2020; Gassar & Cha, 2021; Boccalatte vd., 2022; Han vd., 2022; Gawley vd., 2022; Stack & Narine, 2022; An vd., 2023; Ranjgar & Niccolai, 2023; Zhou vd., 2023; Ni vd., 2024), 3 boyutlu (3B) modelleme (Ren vd., 2022; Liu vd., 2023; Sofias vd., 2023; Waqas vd., 2023; Chen vd., 2024; Shirinyan & Petrova-Antonova, 2024) ve LiDAR (Nelson & Grubesic, 2020; Yıldırım vd., 2021; Adjiski vd., 2023; Hu vd.,2023; Soha vd., 2024; Yadav vd., 2024) teknolojilerini kullanarak kentsel alanlarda güneş PV potansiyelinin araştırılmasına odaklanmıştır. Literatürdeki çalışmaların çoğu, bina, ilçe veya şehir düzeyinde

yürütülmüştür. Bina çatısı bilgilerini elde etmek için 3B CAD (Bilgisayar Destekli Tasarım) tabanlı bir simülasyon araçları, LiDAR, fotogrametri ve uzaktan algılama teknikleri kullanılmıştır. Kat alanı, kat sayısı, toplam bina sayısı gibi bina ile ilgili bilgilerin istatistiksel veri kümeleri, güneş ışınımı coğrafi verileriyle birlikte CBS yazılımlarında işlenmiştir (Bernasconi & Guariso, 2021).

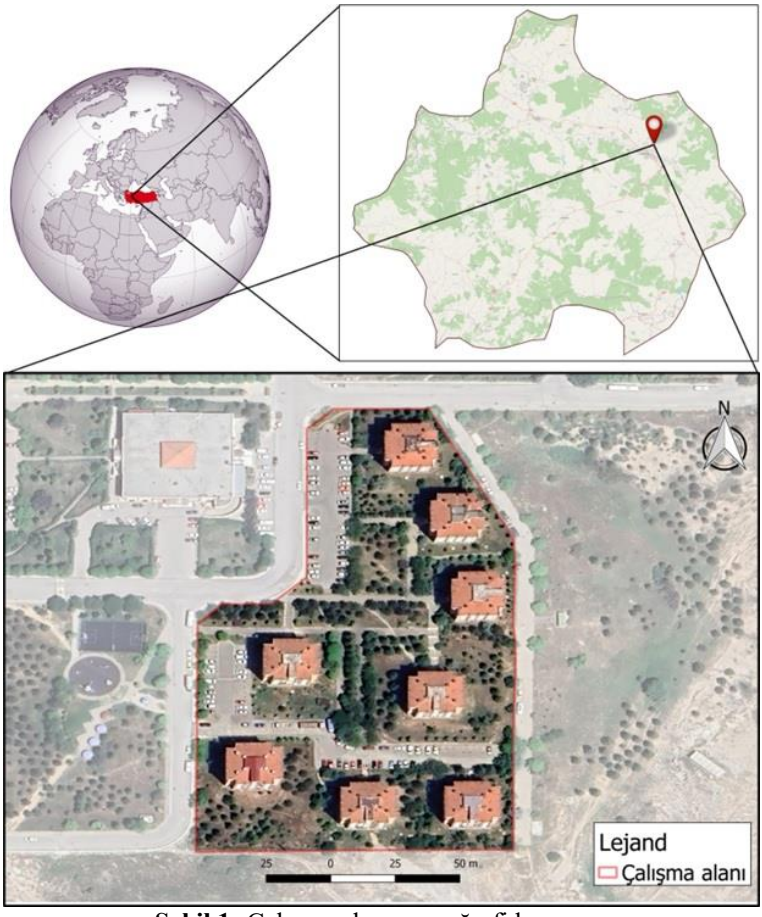
Bu çalışmada, 3B bina modelleri kullanılarak, toplu konut ölçeğinde çatı üstü güneş fotovoltaik potansiyelinin belirlenmesi amacıyla bir yaklaşım sunulmuştur. Bu kapsamda, Sketchup yazılımı ile Kütahya ili Merkez İlçesi Akkent Mahallesi J23-B-05-C-3-D pafta 5434 ada 1 parsel sayılı taşınmaz üzerinde bulunan A, B, C, D, E, F, G ve H numaralı blokların, mimari projeleri esas alınarak LOD-2 ayrıntı düzeyinde 3B modelleri oluşturulmuş ve ardından 3B modeller Autodesk Formit yazılımına aktarılarak binaların çatı üstü güneş fotovoltaik potansiyelleri, aylık ve yıllık bazda analiz edilmiştir. Çalışmada açıklanan yaklaşım, kentsel alanlarda çatı üstü güneş fotovoltaik potansiyelini nicelleştirerek politika yapıcılar, şehir plancıları ve enerji paydaşları için önemli çıkarımlar sunmakta, yenilenebilir enerji kaynaklarının mevcut enerji altyapısına bağlanmasına yönelik kararlar almayı kolaylaştırmakta, daha temiz enerji üretimi ile karbon ayak izini azaltmaya yönelik önemli katkılar sağlamaktadır.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. Çalışma Alanı

Bu araştırmada, Kütahya ili Merkez İlçesi Akkent Mahallesi J23-B-05-C-3-D pafta 5434 ada 1 parsel sayılı taşınmaz üzerinde bulunan A, B, C, D, E, F, G ve H numaralı bloklar çalışma alanı olarak belirlenmiştir. Toplu Konut İdaresi Başkanlığı (TOKİ) tarafından 2006 yılında inşaa edilen bu bloklar, zemin artı altı kattan ve yirmi sekiz adet mesken tipinde bağımsız bölümden oluşmaktadır. Şekil 1'de çalışma alanın coğrafi konumu gösterilmektedir.

Kütahya'nın yıllık güneşlenme süresi 2,559 saat, yıllık güneş ışınım değeri 1,490 kWh/m^2-yıl, günlük ortalama güneşlenme süresi 6,1 saat ve günlük ortalama ışınım değeri 4,08 kWh/m^2-gün'dür (EİGM, 2024).



Şekil 1: Çalışma alanının coğrafi konumu.

2.2. Çalışmanın Materyalleri

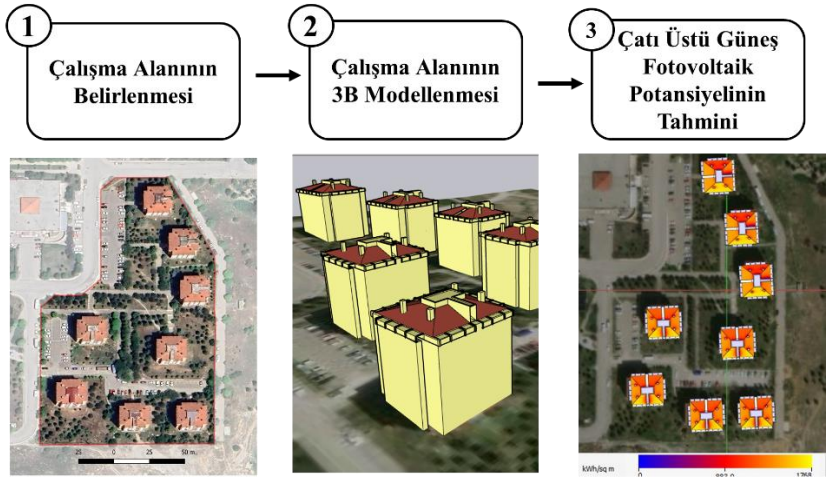
Çalışma alanındaki binaların 3B modellerinin oluşturulmasında SketchUp yazılımı, 3B binaların çatı üstü güneş fotovoltaik potansiyelinin belirlenmesinde Autodesk FormIt Pro yazılımı kullanılmıştır.

SketchUp, mimari tasarım, iç mekân, mobilya, peyzaj, endüstri ürünleri, film ve oyun tasarımında kullanılan 3B modelleme yazılımıdır. 3B çizimler oluşturmak için etkili arayüze sahip yazılımlardan biri olması, çeşitli analizler için güçlü araçlara ve eklenti havuzuna sahip olması, veri alımı ve veri aktarımı bakımından diğer yazılımlarla uyumlu olması ve kullanıcı dostu olması avantajıyla çalışma alanındaki binaların 3B modellerinin oluşturulmasında SketchUp yazılımı tercih edilmiştir.

Autodesk FormIt Pro, daha sürdürülebilir bir yapılaşmış çevre için güneş enerjisi analizi uygulamaları için kullanılan bir yazılımdır. Kullanımının kolay olması, güçlü analiz araçları ile ilgili uygulamalar için hızlı sonuçlar sunmasından dolayı 3B binaların çatı üstü güneş fotovoltaik potansiyelinin belirlenmesinde Autodesk FormIt Pro yazılımı tercih edilmiştir.

2.3. Çalışmanın Yöntemi

Çalışmanın yöntemi; Çalışma alanındaki binaların mimari projeleri esas alınarak, SketchUp yazılımında LOD-2 ayrıntı düzeyinde 3B modellerinin oluşturulması ve 3B modellerin Autodesk FormIt Pro yazılımına aktarılmasıyla binaların çatı üstü güneş fotovoltaik potansiyellerinin, aylık ve yıllık bazda analiz edilmesi aşamalarını içermektedir. Şekil 2'de çalışmada uygulanan yöntemin iş adımları görülmektedir.



Şekil 2: Çalışmanın yöntemi.

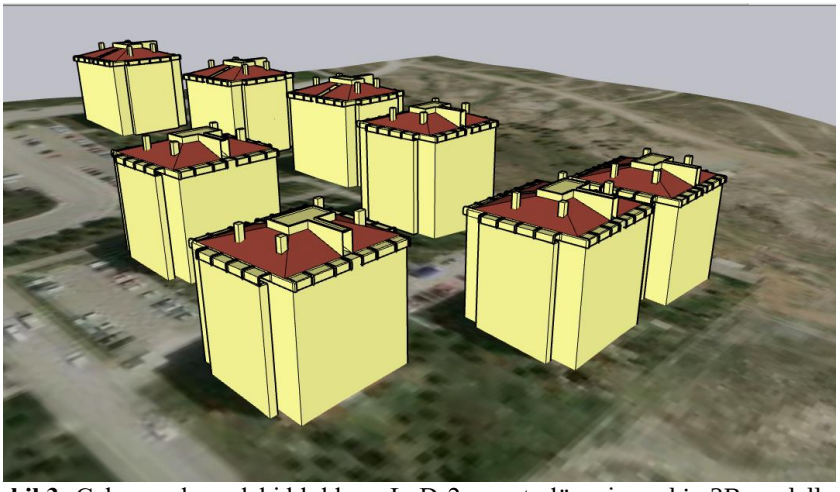
Yöntemin 3B model oluşturma aşamasında, çalışma alanındaki yapıların 3B modelleri, mimari projesinden faydalanılarak SketchUp yazılımında, LoD-2 ayrıntı düzeyinde oluşturulmuştur. 3B model, SketchUp'ın Geolocation işlevi kullanılarak coğrafi olarak konumlandırılmıştır. Yapıların 3B modellerine gerçekçi görünüm kazandırmak ve görselliğini arttırmak amacıyla renklendirme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Daha sonra, yapıların 3B modelleri, çatı üstü güneş fotovoltaik potansiyelinin analizi uygulamasında kullanılmak üzere ".skp" uzantılı model dosyası olarak kaydedilmiştir. Son olarak 3B modeller, Autodesk FormIt Pro yazılımına aktarılarak binaların çatı üstü güneş fotovoltaik potansiyelleri aylık ve

yıl bazda modellenmiştir. Yazılım her ay için BTU/ft^2 yada Wh/m^2 cinsinden, yıl bazında ise kW/m^2 cinsinden tepe güneş ışınımı değerlerini vermektedir.

3. BULGULAR

3.1. 3B model oluşturma

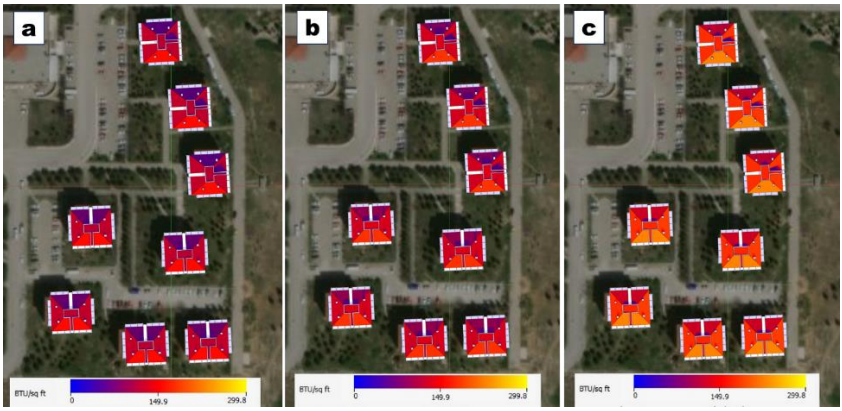
Çalışma alanındaki binaların, LoD-2 ayrıntı düzeyine sahip 3B modelleri, Şekil 3'te gösterilmektedir. Her bir bloğun, bacalar ve çıkmalar hariç net çatı alanı 398,57 m ^{2} olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3: Çalışma alanındaki blokların LoD-2 ayrıntı düzeyine sahip 3B modelleri.

3.2. Çatı Üstü Güneş Fotovoltaik Potansiyelinin Analizi

Çalışma alanının 3B modelinde yapılan simülasyon analizi, bloklardaki çatı yüzeylerinin aylık bazda Wh/m^2 cinsinden, yıllık bazda kWh/m^2 cinsinden aldığı toplam güneş ışınımı miktarını ortaya çıkarmıştır. Daha düşük güneş ışınımı değerleri mavi renkle, daha yüksek güneş ışınımı değerleri ise sarı renkle gösterilmiştir. Analiz ayrıca gölge etkisinin, güneş radyasyonu potansiyeli üzerindeki etkisini de göstermektedir. Şekil 4'te kış mevsiminde çatı üstü güneş fotovoltaik potansiyelinin mekânsal dağılımı gösterilmiştir. Kış mevsiminde, Ocak ayından itibaren güneş ışınımı değerleri artmaya başlamış ve Şubat ayında en yüksek değerlere ulaşmıştır. Kuzeye bakan çatı yüzeyleri en düşük, güneye bakan çatı yüzeyleri ise en yüksek güneş ışınımı değerlerini almıştır.



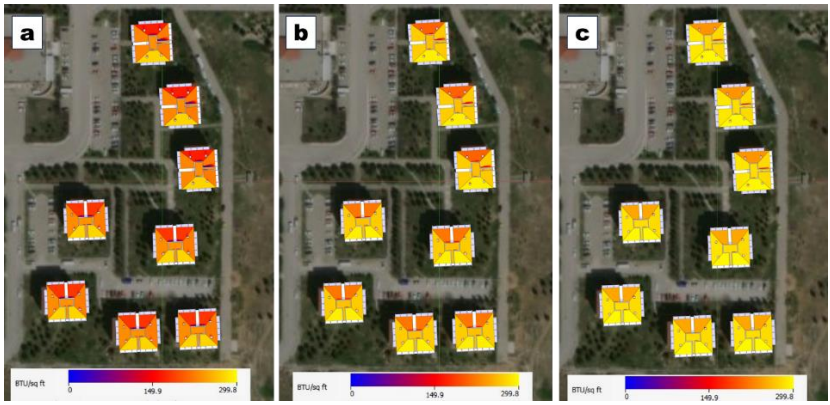
Şekil 4: Kış mevsiminde çatı üstü güneş fotovoltaik potansiyelinin mekânsal dağılımı (a) Aralık; b) Ocak c) Şubat)

Aralık ayında ortalama güneş ışınım değerleri; Doğuya bakan çatı yüzeylerinde 103,9 Wh/m^2, batıya bakan çatı yüzeylerinde 106,5 Wh/m^2, kuzeye bakan çatı yüzeylerinde 37,76 Wh/m^2 ve güneye bakan çatı yüzeylerinde 155,5 Wh/m^2 olarak tahmin edilmiştir.

Ocak ayında ortalama güneş ışınım değerleri; Doğuya bakan çatı yüzeylerinde 120,7 Wh/m^2, batıya bakan çatı yüzeylerinde 115,5 Wh/m^2 kuzeye bakan çatı yüzeylerinde 66,98 Wh/m^2 ve güneye bakan çatı yüzeylerinde 178,9 Wh/m^2 olarak tahmin edilmiştir.

Şubat ayında ortalama güneş ışınım değerleri; Doğuya bakan çatı yüzeylerinde 185,5 Wh/m^2, batıya bakan çatı yüzeylerinde 177,7 Wh/m^2 kuzeye bakan çatı yüzeylerinde 111,9 Wh/m^2 ve güneye bakan çatı yüzeylerinde 226,6 Wh/m^2 olarak tahmin edilmiştir.

Şekil 5'te ilkbahar mevsiminde, çatı üstü güneş fotovoltaik potansiyelinin mekânsal dağılımı gösterilmiştir. İlkbahar mevsiminde, Mart ayından itibaren güneş ışınımı değerleri artmaya başlamış ve Mayıs ayında en yüksek değerlere ulaşmıştır. Kuzeye bakan çatı yüzeyleri en düşük, güneye bakan çatı yüzeyleri ise en yüksek güneş ışınımı değerlerini almıştır.



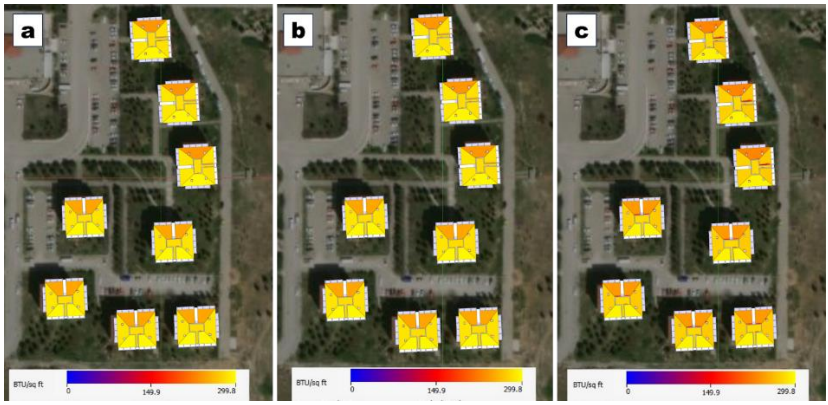
Şekil 5: İlkbahar mevsiminde çatı üstü güneş fotovoltaik potansiyelinin mekânsal dağılımı (a) Mart; b) Nisan c) Mayıs)

Mart ayında ortalama güneş ışınım değerleri; Doğuya bakan çatı yüzeylerinde 224,1 Wh/m^2, batıya bakan çatı yüzeylerinde 232,6 Wh/m^2, kuzeye bakan çatı yüzeylerinde 181,8 Wh/m^2 ve güneye bakan çatı yüzeylerinde 275,4 Wh/m^2 olarak tahmin edilmiştir.

Nisan ayında ortalama güneş ışınım değerleri; Doğuya bakan çatı yüzeylerinde 269,9 Wh/m^2, batıya bakan çatı yüzeylerinde 270,7 Wh/m^2 kuzeye bakan çatı yüzeylerinde 219,6 Wh/m^2 ve güneye bakan çatı yüzeylerinde 290,4 Wh/m^2 olarak tahmin edilmiştir.

Mayıs ayında ortalama güneş ışınım değerleri; Doğuya bakan çatı yüzeylerinde 279,2 Wh/m^2, batıya bakan çatı yüzeylerinde 284,3 Wh/m^2 kuzeye bakan çatı yüzeylerinde 247,5 Wh/m^2 ve güneye bakan çatı yüzeylerinde 295,5 Wh/m^2 olarak tahmin edilmiştir.

Şekil 6'da yaz mevsiminde, çatı üstü güneş fotovoltaik potansiyelinin mekânsal dağılımı gösterilmiştir. Yaz mevsiminde, güneş ışınımı değerleri Haziran ayında en yüksek seviyeye ulaşmıştır. Haziran ayından itibaren güneş ışınımı değerleri azalmaya başlamıştır. Kuzeye bakan çatı yüzeyleri en düşük, güneye bakan çatı yüzeyleri ise en yüksek güneş ışınımı değerlerini almıştır.



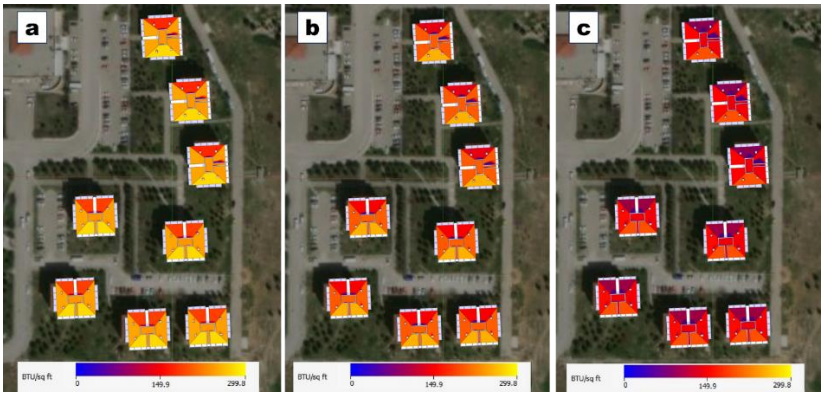
Şekil 6: Yaz mevsiminde çatı üstü güneş fotovoltaik potansiyelinin mekânsal dağılımı (a) Haziran; b) Temmuz c) Ağustos)

Haziran ayında ortalama güneş ışınım değerleri; Doğuya bakan çatı yüzeylerinde 283,8 Wh/m^2, batıya bakan çatı yüzeylerinde 284,9 Wh/m^2, kuzeye bakan çatı yüzeylerinde 248,8 Wh/m^2 ve güneye bakan çatı yüzeylerinde 295,9 Wh/m^2 olarak tahmin edilmiştir.

Temmuz ayında ortalama güneş ışınım değerleri; Doğuya bakan çatı yüzeylerinde 282,9 Wh/m^2, batıya bakan çatı yüzeylerinde 284,6 Wh/m^2 kuzeye bakan çatı yüzeylerinde 247,8 Wh/m^2 ve güneye bakan çatı yüzeylerinde 295,2 Wh/m^2 olarak tahmin edilmiştir.

Ağustos ayında ortalama güneş ışınım değerleri; Doğuya bakan çatı yüzeylerinde 269,1 Wh/m^2, batıya bakan çatı yüzeylerinde 272,8 Wh/m^2 kuzeye bakan çatı yüzeylerinde 240,2 Wh/m^2 ve güneye bakan çatı yüzeylerinde 293,3 Wh/m^2 olarak tahmin edilmiştir.

Şekil 7'de sonbahar mevsiminde, çatı üstü güneş fotovoltaik potansiyelinin mekânsal dağılımı gösterilmiştir. Sonbahar mevsiminde, güneş ışınımı değerleri Eylül ayında en yüksek seviyeye ulaşmıştır. Eylül ayından itibaren güneş ışınımı değerleri azalmaya başlamıştır. Kuzeye bakan çatı yüzeyleri en düşük, güneye bakan çatı yüzeyleri ise en yüksek güneş ışınımı değerlerini almıştır.



Şekil 7: Sonbahar mevsiminde çatı üstü güneş fotovoltaik potansiyelinin mekânsal dağılımı (a) Eylül; b) Ekim c) Kasım)

Eylül ayında ortalama güneş ışınım değerleri; Doğuya bakan çatı yüzeylerinde 243,6 Wh/m^2, batıya bakan çatı yüzeylerinde 247,8 Wh/m^2, kuzeye bakan çatı yüzeylerinde 186,4 Wh/m^2 ve güneye bakan çatı yüzeylerinde 278,1 Wh/m^2 olarak tahmin edilmiştir.

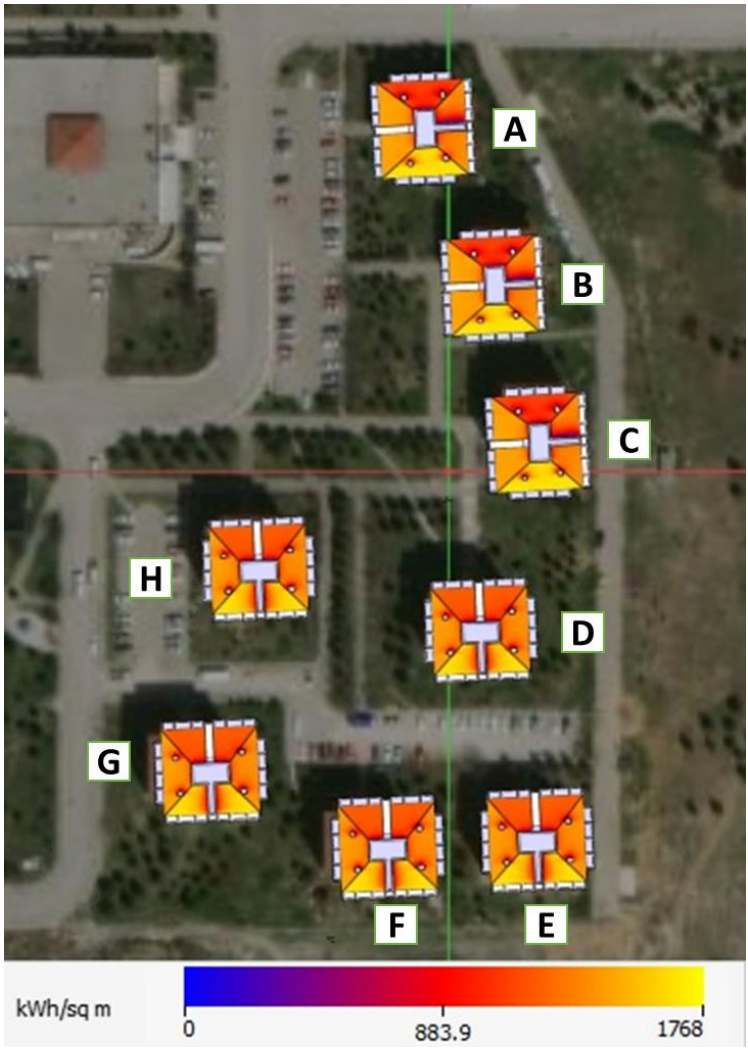
Ekim ayında ortalama güneş ışınım değerleri; Doğuya bakan çatı yüzeylerinde 205,6 Wh/m^2, batıya bakan çatı yüzeylerinde 202,4 Wh/m^2 kuzeye bakan çatı yüzeylerinde 146,4 Wh/m^2 ve güneye bakan çatı yüzeylerinde 254,1 Wh/m^2 olarak tahmin edilmiştir.

Kasım ayında ortalama güneş ışınım değerleri; Doğuya bakan çatı yüzeylerinde 144,2 Wh/m^2, batıya bakan çatı yüzeylerinde 155,7 Wh/m^2 kuzeye bakan çatı yüzeylerinde 76,45 Wh/m^2 ve güneye bakan çatı yüzeylerinde 197,1 Wh/m^2 olarak tahmin edilmiştir.

Şekil 8'de yıllık çatı üstü güneş fotovoltaik potansiyelinin mekânsal dağılımı gösterilmiştir. Yıllık çatı üstü güneş fotovoltaik potansiyelinin mekânsal dağılımı incelendiğinde;

- A Bloğun kuzeye bakan çatı yüzeyi ortalama 1032 kWh/m^2, güneye bakan çatı yüzeyi ortalama 1619 kWh/m^2, doğuya bakan çatı yüzeyi ortalama 1339 kWh/m^2 ve batıya bakan çatı yüzeyi ortalama 1442 kWh/m^2 güneş ışınımı almıştır.
- B Bloğun kuzeye bakan çatı yüzeyi ortalama 1077 kWh/m^2, güneye bakan çatı yüzeyi ortalama 1619 kWh/m^2, doğuya bakan çatı yüzeyi ortalama 1340 kWh/m^2 ve batıya bakan çatı yüzeyi ortalama 1443 kWh/m^2 güneş ışınımı almıştır.

- C Bloğun kuzeye bakan çatı yüzeyi ortalama 1173 kWh/m ^{2}, güneye bakan çatı yüzeyi ortalama 1548 kWh/m ^{2}, doğuya bakan çatı yüzeyi ortalama 1366 kWh/m ^{2} ve batıya bakan çatı yüzeyi ortalama 1548 kWh/m ^{2} güneş ışınımı almıştır.
- D Bloğun kuzeye bakan çatı yüzeyi ortalama 1173 kWh/m ^{2}, güneye bakan çatı yüzeyi ortalama 1548 kWh/m ^{2}, doğuya bakan çatı yüzeyi ortalama 1366 kWh/m ^{2} ve batıya bakan çatı yüzeyi ortalama 1416 kWh/m ^{2} güneş ışınımı almıştır.
- E Bloğun kuzeye bakan çatı yüzeyi ortalama 1175 kWh/m ^{2}, güneye bakan çatı yüzeyi ortalama 1550 kWh/m ^{2}, doğuya bakan çatı yüzeyi ortalama 1366 kWh/m ^{2} ve batıya bakan çatı yüzeyi ortalama 1413 kWh/m ^{2} güneş ışınımı almıştır.
- F Bloğun kuzeye bakan çatı yüzeyi ortalama 1174 kWh/m ^{2}, güneye bakan çatı yüzeyi ortalama 1550 kWh/m ^{2}, doğuya bakan çatı yüzeyi ortalama 1360 kWh/m ^{2} ve batıya bakan çatı yüzeyi ortalama 1413 kWh/m ^{2} güneş ışınımı almıştır.
- G Bloğun kuzeye bakan çatı yüzeyi ortalama 1185 kWh/m ^{2}, güneye bakan çatı yüzeyi ortalama 1549 kWh/m ^{2}, doğuya bakan çatı yüzeyi ortalama 1364 kWh/m ^{2} ve batıya bakan çatı yüzeyi ortalama 1417 kWh/m ^{2} güneş ışınımı almıştır.
- H Bloğun kuzeye bakan çatı yüzeyi ortalama 1175 kWh/m ^{2}, güneye bakan çatı yüzeyi ortalama 1547 kWh/m ^{2}, doğuya bakan çatı yüzeyi ortalama 1366 kWh/m ^{2} ve batıya bakan çatı yüzeyi ortalama 1417 kWh/m ^{2} güneş ışınımı almıştır.



Şekil 8: Yıllık çatı üstü güneş fotovoltaik potansiyelinin mekânsal dağılımı

4. TARTIŞMA, SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, 3B bina modelleri kullanılarak, toplu konut ölçeğinde toplam çatı üstü güneş fotovoltaik potansiyelinin aylık periyotlarda ve tüm yıl boyunca belirlenmesi üzerine bir analiz gerçekleştirilmiştir. Çalışma, Kütahya ili Merkez İlçesi Akkent Mahallesi J23-B-05-C-3-D pafta 5434 ada 1 parsel sayılı taşınmaz üzerinde bulunan A, B, C, D, E, F, G ve H numaralı bloklara uygulanmıştır. Kentsel binaların 3B modelleri, kentsel dijital ikizlerin temel bir bileşenidir ve son yıllarda güneş analizinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Şehirdeki güneş radyasyonunu modellemeye yönelik çeşitli yaklaşımların bir incelemesini yürüten Freitas vd., (2015) araştırmalarında, 3B modellerin geliştirilmesinin önemini, 2,5 B hesaplamalarla karşılaştırıldığında 3B tabanlı analizlerin, kentsel bina enerji modellemesi veya dış mekân mikro ikliminin modellenmesi gibi çevresel çalışmalarda daha ileri adımlar için umut verici bir yaklaşım olduğunu belirtmişlerdir.

Bu çalışma, sürdürülebilir kentsel planlama için 3B şehir modelleme ve güneş enerjisi potansiyeli tahmininin entegre edilmesinin önemini göstermektedir. PV kurulumunda bilinçli kararlar alınmasını sağlar, yenilenebilir enerji entegrasyonunu artırır, kamu katılımını teşvik eder ve disiplinler arası iş birliği yoluyla yenilenebilir enerji çözümlerinin ilerlemesi için coğrafi bilgi sistemlerinin potansiyelini sergiler. Çalışmada açıklanan yaklaşım, kurulum için daha doğru güneş paneli boyutlandırmasına, ev sahipleri, kiracılar ve ticari enerji yatırımcıları için güneş radyasyonunun hassas bir şekilde hesaplanmasına uygulanabilir ve bunun sonucunda yenilenebilir enerji kaynaklarının etkili bir şekilde kullanımı sağlanabilir. Bu yöntemle yürütülen değerlendirme, gelecekte güneş enerjisiyle çalışan kentler için bir teşvik sağlar.

Son yıllarda güneş enerjisine olan farkındalığın artması ve teşviklerle fotovoltaik çatı uygulamaları hız kazanmıştır. Çatı alanlarında bulunan baca, anten, aydınlatma vb. gibi etkenler nedeniyle yer kayıpları meydana gelmektedir (Diahovchenko & Petrichenko, 2022). Güneş enerjisi sistemlerinde en yüksek verim güney yöneliminde kurulum ile elde edilmektedir. Ancak güney yöneliminde kurulan çatı güneş enerjisi sistemlerinde güneşin ilk ve son saatlerinde üretim düşüktür (Agathokleous & Kalogirou, 2021; Ceran vd., 2021). Ayrıca çatı alanının sınırlı olduğu yerlerde aynı çatı alanı için güney yönelimine göre doğu-batı yöneliminde daha fazla kurulu güce sahip güneş enerjisi sistemi kurulabilir. Sınırlı çatı alanlarında santral kurulu gücünü ve güneşin ilk ve son saatlerindeki üretimi artırmak için son yıllarda doğu-batı yönelimli sistemler hızla artmaktadır (Anang vd., 2021; Dolara vd., 2022). Apama Sankar ve Anish Kalathil (2014) araştırmalarında, mevsim, güneş açısı, güneşlenme süresi ve hava koşulları gibi

farklı değişkenlerin etkisi altında doğu-batı ve güney yönelimli fotovoltaik sistemlerin performansını araştırmışlardır. Mart, Haziran, Eylül ve Aralık ayları için her 15 dakikada bir alınan gerçek zamanlı verileri karşılaştırmışlardır. Doğu-batı yönelimli sistemin söz konusu aylarda güney yönelimli sisteme göre yaklaşık %6 daha fazla üretim ürettiğini bulmuşlardır. Ayrıca enerji üretiminin doğu-batı yönelimli sistemde sabah ve öğleden sonra saatlerinde daha yüksek olduğunu, güney yönelimli sistemde ise gün ortasında daha fazla olduğunu ortaya koymuşlardır. Bu şekilde, doğu-batı sistemlerinin gün içinde daha uzun ve daha iyi çalışmak için yük profiline uyduğunu tespit etmişlerdir. Bu çalışmada, yıl bazında en fazla güneş ışınımı değerlerini güneye bakan çatı yüzeyleri, daha sonra sırasıyla batıya bakan çatı yüzeyleri ve doğuya bakan çatı yüzeyleri, en az güneş ışınımı değerlerini ise kuzeye bakan çatı yüzeyleri almıştır. Binaların çatı yüzeylerinde ortaya çıkan, güneş ışınımı dağılımındaki mekânsal heterojenliğin, bacaların ve çatı bileşenlerinin kendi kendini gölgelemesinden kaynaklandığı tespit edilmiştir. Bu çalışmanın sonuçları, Apama Sankar ve Anish Kalathil (2014) araştırmalarında elde ettikleri sonuçlarla benzerlik göstermektedir. Çalışma alanı, enerji taleplerini karşılamak için doğal gaz ve kömür gibi fosil yakıtlara büyük ölçüde bağımlıdır. Ancak bu yakıtların yakılması önemli miktarda karbondioksit salımına neden olmaktadır. Bu durum hem yerel hem de küresel düzeyde karbon emisyonlarına ve iklim değişikliğine sebebiyet vermektedir. Daha sürdürülebilir bir enerji yaklaşımını benimsemek için 3B güneş ışınımı tahmini, uygulanabilir bir çözüm olarak ortaya çıkmaktadır. Çalışma alanında yüksek katlı binaların varlığı, yakındaki ağaçların gölgesinden etkilenmediği için çatı üstü güneş enerjisi kurulumu için avantajlı olduğunu kanıtlamaktadır. Bu çalışma, yüksek binaların çatılarına güneş panellerinin entegre edilmesinin potansiyelini vurgulayarak, bitki örtüsünün müdahalesi olmadan verimli enerji üretimine olanak sağlamaktadır.

Çalışmanın sınırlılıklarından biri yalnızca bina çatılarının güneş enerjisi potansiyelinin analizine odaklanmasıdır. Daha ayrıntılı mekânsal verilerle bu analiz, çalışma alanında bulunan bina cepheleri, beton kaldırımlar ve park alanları gibi diğer kentsel özellikleri içerebilir. Diğer bir sınırlılık ise, meteoroloji istasyonu verilerinin yetersizliği ve diğer sosyolojik ve ekonomik faktörlerin eksikliğidir. Bu faktörler, araştırma alanında PV kurulumunun daha iyi planlanmasına yardımcı olmak için gelecekteki çalışmalara dahil edilebilir.

KAYNAKÇA

Adjiski, V., Kaplan, G., & Mijalkovski, S. (2023). Assessment of the solar energy potential of rooftops using LiDAR datasets and GIS based approach. International Journal of Engineering and Geosciences, 8(2), 188-199.

Agathokleous, R. A., & Kalogirou, S. A. (2021). PV roofs as the first step towards 100% RES electricity production for Mediterranean islands: The case of Cyprus. Smart Energy, 4, 100053.

Allouhi, A. (2020). Solar PV integration in commercial buildings for self-consumption based on life-cycle economic/environmental multi-objective optimization. Journal of Cleaner Production, 270, 122375.

An, Y., Chen, T., Shi, L., Heng, C. K., & Fan, J. (2023). Solar energy potential using GIS-based urban residential environmental data: A case study of Shenzhen, China. Sustainable Cities and Society, 93, 104547.

Anang, N., Azman, S. S. N., Muda, W. M. W., Dagang, A. N., & Daud, M. Z. (2021). Performance analysis of a grid-connected rooftop solar PV system in Kuala Terengganu, Malaysia. Energy and Buildings, 248, 111182.

Bernasconi, D., & Guariso, G. (2021). Rooftop PV: Potential and Impacts in a Complex Territory. Energies, 14(12), 3687.

Boccalatte, A., Thebault, M., Ménézo, C., Ramousse, J., & Fossa, M. (2022). Evaluating the impact of urban morphology on rooftop solar radiation: A new city-scale approach based on Geneva GIS data. Energy and Buildings, 260, 111919.

Calcabrini, A., Ziar, H., Isabella, O., & Zeman, M. (2019). A simplified skyline-based method for estimating the annual solar energy potential in urban environments. Nature Energy, 4(3), 206-215.

Ceran, B., Jurasz, J., Mielcarek, A., & Campana, P. E. (2021). PV systems integrated with commercial buildings for local and national peak load shaving in Poland. Journal of Cleaner Production, 322, 129076.

Chen, Z., Yang, B., Zhu, R., & Dong, Z. (2024). City-scale solar PV potential estimation on 3D buildings using multi-source RS data: A case study in Wuhan, China. Applied Energy, 359, 122720.

Choi, Y., Suh, J., & Kim, S. M. (2019). GIS-based solar radiation mapping, site evaluation, and potential assessment: A review. Applied Sciences, 9(9), 1960.

Diahovchenko, I., & Petrichenko, L. (2022). Comparative Analysis of Power Distribution Systems with Individual Prosumers Owing Photovoltaic Installations and Solar Energy Communities in Terms of Profitability and Hosting Capacity. Energies, 15(23), 8837.

Dolara, A., Leva, S., Manzolini, G., Simonetti, R., & Trattenero, I. (2022). Outdoor performance of organic photovoltaics: Comparative analysis. Energies, 15(5), 1620.

Freitas, S., Catita, C., Redweik, P., & Brito, M. C. (2015). Modelling solar potential in the urban environment: State-of-the-art review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 41, 915-931.

Gassar, A. A. A., & Cha, S. H. (2021). Review of geographic information systems-based rooftop solar photovoltaic potential estimation approaches at urban scales. Applied Energy, 291, 116817.

Gawley, D., & McKenzie, P. (2022). Investigating the suitability of GIS and remotely-sensed datasets for photovoltaic modelling on building rooftops. Energy and Buildings, 265, 112083.

Han, J. Y., Chen, Y. C., & Li, S. Y. (2022). Utilising high-fidelity 3D building model for analysing the rooftop solar photovoltaic potential in urban areas. Solar Energy, 235, 187-199.

Hu, M., Liu, Z., Huang, Y., Wei, M., & Yuan, B. (2023). Estimation of Rooftop Solar Photovoltaic Potential Based on High-Resolution Images and Digital Surface Models. Buildings, 13(11), 2686.

Huang, Z., Mendis, T., & Xu, S. (2019). Urban solar utilization potential mapping via deep learning technology: A case study of Wuhan, China. Applied Energy, 250, 283-291.

Hong, T., Lee, M., Koo, C., Jeong, K., & Kim, J. (2017). Development of a method for estimating the rooftop solar photovoltaic (PV) potential by analyzing the available rooftop area using Hillshade analysis. Applied Energy, 194, 320-332.

Kuhn, T. E., Erban, C., Heinrich, M., Eisenlohr, J., Ensslen, F., & Neuhaus, D. H. (2021). Review of technological design options for building integrated photovoltaics (BIPV). Energy and Buildings, 231, 110381.

Liu, J., Wu, Q., Lin, Z., Shi, H., Wen, S., Wu, Q., Zhang J., & Peng, C. (2023). A novel approach for assessing rooftop-and-facade solar photovoltaic potential in rural areas using three-dimensional (3D) building models constructed with GIS. Energy, 282, 128920.

Luthander, R., Widén, J., Nilsson, D., & Palm, J. (2015). Photovoltaic self-consumption in buildings: A review. Applied energy, 142, 80-94.

Mishra, T., Rabha, A., Kumar, U., Arunachalam, K., & Sridhar, V. (2020). Assessment of solar power potential in a hill state of India using remote sensing and Geographic Information System. Remote Sensing Applications: Society and Environment, 19, 100370.

Mohajeri, N., Assouline, D., Guiboud, B., Bill, A., Gudmundsson, A., & Scartezzini, J. L. (2018). A city-scale roof shape classification using machine learning for solar energy applications. Renewable Energy, 121, 81-93.

Mrabet, Z., Alsamara, M., Saleh, A. S., & Anwar, S. (2019). Urbanization and non-renewable energy demand: A comparison of developed and emerging countries. Energy, 170, 832-839.

Nelson, J. R., & Grubesic, T. H. (2020). The use of LiDAR versus unmanned aerial systems (UAS) to assess rooftop solar energy potential. Sustainable Cities and Society, 61, 102353.

Ni, H., Wang, D., Zhao, W., Jiang, W., Mingze, E., Huang, C., & Yao, J. (2024). Enhancing rooftop solar energy potential evaluation in high-density cities: A Deep Learning and GIS based approach. Energy and Buildings, 309, 113743.

Sampaio, P. G. V., & González, M. O. A. (2017). Photovoltaic solar energy: Conceptual framework. Renewable and sustainable energy reviews, 74, 590-601.

Sankar, A., & Kalathil, A. (2014, August). Qualitative validation of empirically observed higher generation in East-West orientated PV arrays over conventional South orientation. In 2014 IEEE Region 10 Humanitarian Technology Conference (R10 HTC) (pp. 25-28). IEEE.

Shirinyan, E., & Petrova-Antonova, D. (2024). Large-Scale Solar Potential Analysis in a 3D CAD Framework as a Use Case of Urban Digital Twins. Remote Sensing, 16(15), 2700.

Sofias, K., Kanetaki, Z., Stergiou, C., & Jacques, S. (2023). Combining CAD modeling and simulation of energy performance data for the retrofit of public buildings. Sustainability, 15(3), 2211.

Stack, V., & Narine, L. L. (2022). Sustainability at Auburn University: Assessing Rooftop Solar Energy Potential for Electricity Generation with Remote Sensing and GIS in a Southern US Campus. Sustainability, 14(2), 626.

Suomalainen, K., Wang, V., & Sharp, B. (2017). Rooftop solar potential based on LiDAR data: Bottom-up assessment at neighbourhood level. Renewable Energy, 111, 463-475.

Ranjgar, B., & Niccolai, A. (2023). Large-scale rooftop solar photovoltaic power production potential assessment: A case study for tehran metropolitan area, iran. Energies, 16(20), 7111.

Ren, H., Xu, C., Ma, Z., & Sun, Y. (2022). A novel 3D-geographic information system and deep learning integrated approach for high-accuracy building rooftop solar energy potential characterization of high-density cities. Applied Energy, 306, 117985.

Soha, T., Sugár, V., & Hartmann, B. (2024). City-scale analysis of PV potential and visibility in heritage environment using GIS and LiDAR. Energy and Buildings, 311, 114124.

Waqas, H., Jiang, Y., Shang, J., Munir, I., & Khan, F. U. (2023). An Integrated Approach for 3D Solar Potential Assessment at the City Scale. Remote Sensing, 15(23), 5616.

Yadav, Y., Harshit, Kushwaha, S. K. P., Zlatanova, S., Boccardo, P., & Jain, K. (2024). Assessing Photo-Voltaic Potential in Urban Environments: A Comparative Study between Aerial Photogrammetry and LiDAR Technologies. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 48, 533-539.

Yıldırım, D., Büyüksalih, G., & Şahin, A. D. (2021). Rooftop photovoltaic potential in Istanbul: Calculations based on LiDAR data, measurements and verifications. Applied Energy, 304, 117743.

Zhou, Y., Wilmink, D., Zeman, M., Isabella, O., & Ziar, H. (2023). A geographic information system-based large scale visibility assessment tool for multi-criteria photovoltaic planning on urban building roofs. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 188, 113885.

BÖLÜM 37

Otomotiv Sektöründe Kullanılan Hibrit Kompozit Malzemeler

Sevim Geçici[1] & Ceyhun Yapıcı[1] & Murat Makaracı[2]

[1] Galsan Plastik ve Kalıp Sanayi A.Ş., Gebze, TÜRKİYE,
[2] Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Kocaeli, TÜRKİYE, Sorumlu Yazar

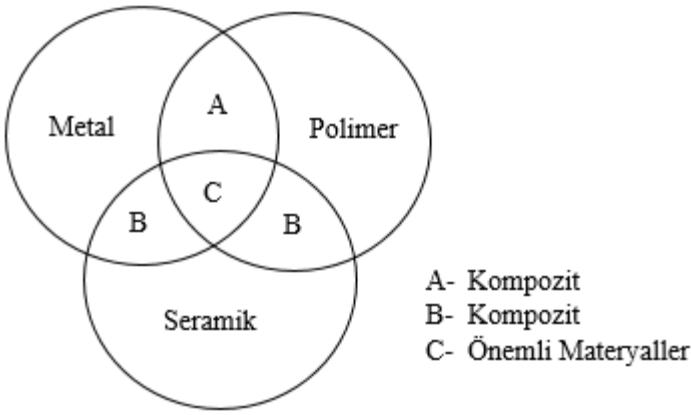
I. GİRİŞ

Farklı malzemelerin birden fazla bir araya gelmesiyle oluşturularak elde edilen yeni malzemelere kompozit denir. Kompozit malzemelerde genellikle taşıyıcı bir ana bileşen (polimer, metal, seramik vb.) ve onun özelliklerini artıran bir veya daha fazla katkı malzemeleri bulunur. Kompozit malzemeler kendisi oluşturan temel bileşenlere kıyasla mekanik özellikleri geliştirilmiştir [1]. Geleneksel malzemelerle karşılaştırıldığında, kompozitlerin çoğu yüksek özgül mukavemet, daha az ağırlık, yüksek korozyon direnci vb. özelliklere sahiptir. Kompozitlerin önemli yararları ve özellikleri., geliştirilmiş mukavemet, yüksek yorulma mukavemeti, düşük ağırlık, yüksek yüzey kalitesidir. Genel olarak otomotiv endüstrisinde kompozit malzemeler, en yaygın kullanılan metallerle karşılaştırıldığında ağırlık olarak daha hafiftir. Otomotiv, havacılık, askeri ve spor ürünlerinde kullanılan Karbon Elyaf içerikli kompozit malzemeler en işlevsel polimer kompozittir [2]. Konvansiyonel otomobillerde, metaller taşıtların merkezi yapısını oluştururken, bazı iç kısımlar kompozitlerle imal edilmektedir. Araç ağırlığının azaltılması için Karbon Elyaf Kompozitler, metallerden farklı olarak pahalı olmakla birlikte en uygun malzeme olarak kabul edilmektedir [3]. Alüminyum alaşımları kullanılarak, kompozitlerin mikro yapıları ve yüzey morfolojileri gibi mekanik özellikleri geliştirilebilir [4]. Otomotiv sektöründe kullanılan kompozit malzemeler otomotiv uygulamaları için genel olarak özel malzemeler olarak karakterize edilir [5]. Otomobilleri oluşturan malzemelerin yaklaşık olarak yarısı çelik ve dökme demirden oluşmaktadır. Alüminyum alaşımları toplamın yaklaşık %9'unu oluştururken, plastikler %11'ini ve kauçuk %3'ünü oluşturur [6]. Günümüzde endüstriler üretim sektöründe; geri dönüştürülebilir, çevre dostu ve daha az zararlı küresel etkiye sahip malzemelerin kullanılması üzerine çalışmalar yapmaktadır [7].

Otomobil sektörünün güçlü çözümler gerektiren en büyük mücadele konularından biri de yakıt tüketimi ve emisyonların azaltılmasıdır. Enerji üretimi karbon bazlı fosil yakıtlara dayandığından, çevreye çok miktarda sera gazı salınır. Araçlarda yakıt verimliliğini artırmak için araçların çoğu bileşeninin kompozit malzemelerden üretilmesi nedeniyle ağırlık olarak daha hafifler. Enerji verimliliği sorunlarıyla başa çıkmak için çok sayıda araştırmacı, farklı araç bileşenlerinin, araç ağırlığını azaltırken yakıt tasarrufunu artıracak alternatif hafif malzemelerle değiştirilmesini önermişlerdir [8]-[11]. Araç ağırlığının her 10 kg'ı azaltıldığında 1g/km karbon salımı düşüşü gözlenmekte ve böylece yakıt tüketimi azalmaktadır. Bu nedenle kompozit malzemeler, gelişmiş mekanik özellikleri gibi avantajları

ile potansiyel olarak ağırlığı azaltılmış ve yüksek mukavemetli komponentlerin üretimi için öncelikli olarak tercih edilmektedir. Araç ağırlığını azaltmak ve Karbon Elyaf Takviyeli Plastik (CFRP) gibi hafif malzemelerin üretimi için ucuz üretim yöntemleri geliştirmek için sürekli devam eden bir çaba vardır. Geleneksel malzemelere göre karbon elyaf bileşikleri, yüksek sertlik, titreşime karşı iyi direnç, azaltılmış ağırlık, daha yüksek mukavemet ve korozyon direnci gibi üstün özellikler göstermektedir [12]. Çin, son birkaç yılda Karbon Elyaf Takviyeli Kompozitler üzerine birçok araştırma yapmıştır [13]. Bununla birlikte en önemli çalışmalardan biriside karbon nanotüpler ile ilgili çalışmalardır.

Yaygın olarak bilinen diğer kompozitler ise Elyaf Takviyeli Kompozitler (FRP)'dir. Karbon Elyafla Güçlendirilmiş Kompozit (CFRC) ve Camla Güçlendirilmiş Plastik (GRP), iki yaygın Elyaf Takviyeli Kompozit (FRP) türüdür. CFRC ve GRP'nin üretiminde kullanılan elyaf malzemeler sırasıyla karbon ve camdır. Metal Matris Kompozit (MMC), Seramik Matris Kompozit (CMC), Polimer Matris Kompozit (PMC) ve Gelişmiş Kompozitler (ACM), kompozit ahşap olarak bilinen malzemelerdir. Gelişmiş kompozitlerin üretimlerinde, düşük yoğunluklu ve yüksek mukavemetli liflerin kullanılması nedeniyle geleneksel kompozitlerden daha yüksek dayanımlara, sertliğe ve Elastisite modülüne ve daha düşük yoğunluklara sahiptir. Ven diyagramı kullanılarak malzemelerin sınıflandırılması Şekil 1'de gösterilmektedir.



Şekil 1. *Kompozit çeşitlerinin ilişkilerinin gösterilmesi [14].*

II. OTOMOBİLLER İÇİN KOMPOZİTLER

A. ELYAF TAKVİYELİ KOMPOZİTLER

Elyaf takviyeli kompozitlerin büyüme sürecinde, polimerler takviye malzemeleri olarak ikinci en önemli bileşen konumuna ulaşmıştır. Araştırmacılar; boyutsal kararlılık, mekanik özellikler ve termal direnç gibi matris malzeme performansını iyileştirme hedefiyle çok sayıda takviye malzemesi kullanarak denemeler yapmıştır. Polimer matris kompozitlerde kullanılan çeşitli elyaf grupları arasında karbon elyafın en önemli olduğu kabul edilir. CFRP (Karbon Elyafla Güçlendirilmiş Plastik) kompozit için küresel gelirin 28,2 milyar ABD Dolarından yaklaşık 48,7 milyar ABD Dolarına yükseleceği tahmin edilmektedir. Elyaf komponentlerden oluşan farklı bir kompozit türü de Elyaf Takviyeli Plastik Kompozit (FRP)' tir [15]. FRP (Elyaf Takviyeli Plastik Kompozit), daha yüksek mukavemetli, sert, daha yüksek kırılma tokluğu ve daha hafif bir kompozittir. Elyaf Takviyeli Plastik Kompozit malzemeler, kendisini oluşturan komponentlerin çeşitli fiziksel özelliklerini gösterir. Mühendislik sektöründe Elyaf Takviyeli Plastik Kompozit; otomobil, denizcilik, bina inşaatı ve uçak vb. yük taşıyan komponentlerde sıklıkla kullanılır. Otomobil sektörü ile ilgili olarak, kompozitler aracın karmaşık profilinin kolayca oluşturabilmesi için otomobil gövdelerinin imalatında en önde gelen seçim olarak kabul edilmektedir. Japonya'da Ulusal Kompozit Merkezi'nde (NCC), kompozitlere dayalı bir proje için, alüminyum alaşımlarından üretilen bir aracın şasisinin tüm parçalarının değiştirilmesinde CFRP kompozit teknolojisi kullanılır. Aracın ağırlığını %10 oranında azaltmak için Karbon Elyaf Takviyeli Kompozit, yeterli rijitlik ve mekanik özelliklere sahip alternatif hafif malzeme olarak kullanımı önerilmiştir [16], [17].

Kompozitler; araç gövde yapıları, tavan yapıları, tamponlar gibi çeşitli gelişmekte olan metal bileşenlerin yerine kullanılarak kritik bir avantaj sağlamaktadır. Yüksek performanslı otomobil üretiminde FRP kompoziti, önemli görev almaktadır [18]. CFRP, alüminyum ve çelik gibi geleneksel Metallerle karşılaştırıldığında, daha yüksek ağırlık azaltma kapasitesi, yüksek özgül dayanım, yüksek darbe dayanımı ve sertlik vb. üstün özellikler göstermektedir. Otomotiv endüstrileri, bu nedenle birkaç yıldır özellikle CFRP içerikli kompozit malzemeleri kullanmaya başlamıştır. Günümüzde yaygın olarak kullanılan kompozitler; cam, karbon ve aramid liflerdir [19]. Karbon elyaflar, cam elyaflar ile karşılaştırıldığında, cam elyaflar daha düşük sertlikte ve daha ağır özelliğe sahiptir. Bu nedenle yüksek performanslı uygulama için, karbon elyaflar kullanılmaktadır. Aracın ağırlığında yaklaşık %60 oranında kayda değer bir azalma elde etmek için, çeliğin CFRP kompozit ile ikame edilmesi gerekmektedir [20]. Kırpılmış Karbon Elyaf Takviyeli Kompozit malzeme, farklı kompozitlerle karşılaştırıldığında özgül

enerji emilimi (SEA) daha yüksektir. Bu karbon elyaf kompozit malzemenin, çarpmaya karşı daha yüksek dayanım özelliği olduğunu göstermiştir. Wazeera ve ark. aracın belirli konumlarında yalnızca 4.27 kg kırpılmış karbon elyafın kullanılmasıyla elde edilen CFRC kompozit parçaların 35 mph (56.3 km/saat) hızla bir çarpışma sırasında yolcunun güvenliğini sağlamak için yeterli olduğunu tespit etmişlerdir. Son zamanlarda, karbon kompozitler birçok otomobil üreticisi tarafından; araba tavanları, zemin panelleri, kompozit yolcu hücreleri, kabin çerçeveleri, şanzıman tünelleri, tavan direkleri, ön ve arka tamponlar ve araç arka zeminlerin imalatında kullanılmaktadır. İncelemeler, CFRP'nin aracın çelik gövde yapısı, tekerlek jantları, tampon destekleri, araba çatıları, kapı modülleri, hava emme manifoldu sistemleri ve bagaj kapakları vb. için potansiyel olarak kullanılabileceğini göstermektedir. Otomotiv sektöründe kullanılan kompozit malzeme örnekleri Şekil 2'de gösterilmiştir [21].



Şekil 2. *Otomotiv endüstrisinde kullanılan kompozit malzeme örnekleri [21].*

B. METAL İÇERİKLİ KOMPOZİTLER

Al_2O_3, SiC, B, C ve B_4C ile muamele edilen alüminyum, MMC (Metal İçerikli Kompozitler) için yaygın olarak kullanılmaktadır. Otomotiv sektöründe, alüminyum oksit takviyeli alüminyum yaygın olarak kullanılmaktadır. Uçakların kanat panellerini yapmak için SiC ile güçlendirilmiş alüminyum uygulaması yaygın olarak kullanılmaktadır. Magnezyum Matrisli Kompozitler, grafit lifleri ile birlikte uydu ve uzay yapılarında kullanılmaktadır. Fren kampanası, biyel kolu ve

piston gövdesi gibi çok sayıda geleneksel otomobil bileşende, metal matris bazlı kompozit malzeme kullanılmaktadır. Daha yüksek mukavemete sahip bileşenlere talep olduğu yerlerde titanyum alaşımlarının önemli uygulamaları mevcuttur. Titanyum içerikli kompozit malzemeler, içten yanmalı bileşenlerin ve valf gövdesinin yapımında uygulanmaktadır. Geleneksel alaşımlar ile Nikel içerikli kompozit malzemeler karşılaştırıldığında, Nikel içerikli kompozit malzemeler daha yüksek mekanik özellikler göstermektedir [23]. Nikel alaşımları türbin kanatlarının üretiminde kullanılmaktadır. Magnezyum alaşımları, daha iyi mekanik özellikler ve yoğunluk vb. özellikleri nedeniyle kompozit malzemelerde kullanımı tercih edilmektedir. Bakır içerikli kompozit malzemeler genellikle toz metalürjisi yöntemiyle üretilir ve yüksek mekanik özellikler göstermektedir. Daha küçük parçacıkların homojen dağılmasını bu yöntem sağlamaktadır. Elektrik ürünlerinde, Bakır içerikli kompozit malzemeler kullanılmaktadır. Üretim sektöründe, daha iyi mekanik özellikler ve hafiflik gibi özellikler nedeniyle gelişmiş nanokompozit malzeme ihtiyacı artmaktadır. Polimer nanokompozit malzemeler, günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır. Nanotüpler, nanoplateletler, nanopartiküller, nanolifler ve nanoteller vb. nanomalzemeler işlevsel özellikleri sebebiyle incelenmektedirler. Nanokompozitler, iletişim ve veri depolama amaçlı elektronik endüstrisinde kullanılmaktadır [21].

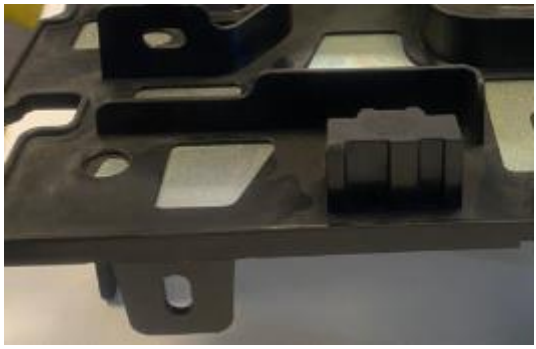
Hibrit yapılar olarak bilinen en iyi örneklerden biride sacların üzerine plastik kaplanması veya basılmasıdır. Literatürde bununla ilgili birçok örnek vardır. Metal Plastik Hibrit ürün örnekleri Şekil 3'te gösterilmektedir [22].



Şekil 3. *Metal Plastik Hibrit ürün örnekleri [22].*

Bu örnekler, kalıbın içine komple sac yerleştirilerek üzerine plastik kaplanması, sacın kalıba konularak sadece bir kısmının plastik kaplanması şeklinde de olabilir. Bununla ilgili en iyi çalışmalardan biride Galsan Plastik ve Kalıp A.Ş.

tarafından yapılmıştır. Galsan firmasında, çok işlevli ve üç boyutlu olan bir plastik parçanın kırılması vb. çeşitli problemlerinden dolayı sağlamlaştırılması amacıyla içine sac konularak işlevini kaybetmeden sağlamlaştırılması sağlanmıştır. Tasarım çalışmaları Galsan tarafından yapılmıştır. Burada sacın üzerine plastik seçmeli bir şekilde Plastik Enjeksiyon yöntemiyle kaplanmıştır. Bu ürünün bir görüntüsü Şekil 4'te gösterilmektedir. Bu çalışma sonucunda plastik parça yerine sac plastik parça takılmış boyama gibi masraflı prosesler uygulanmamış, hem plastik olarak işlevlerini görmüş hemde sac yapısı ile gerekli sağlamlığı ve ehemmiyeti sağlamıştır.



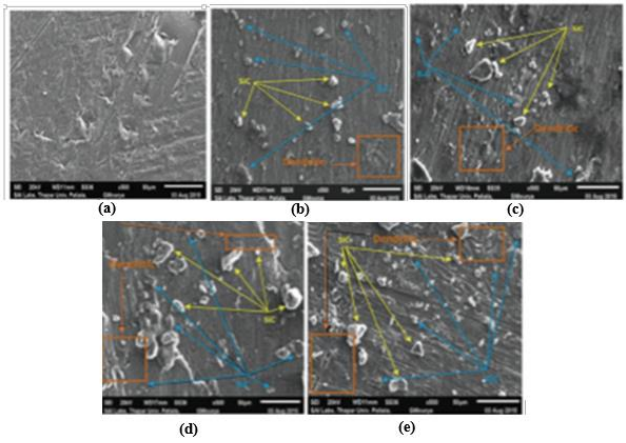
Şekil 4. *Galsan tarafından geliştirilen sac plastik hibrit parça görüntüsü.*

c. ALÜMİNYUM MATRİSLİ HİBRİT KOMPOZİTLER

AMC (Alüminyum Matris Kompozitler); üstün tribolojik ve mekanik özelliklerinden dolayı havacılık ve otomobil endüstrilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. AMC'lerin uygulanmasıyla, dayanıklı, hafif ve yüksek performanslı ekipman ihtiyacı karşılanmaktadır [25], [26]. AMC'ler geleneksel alaşımlara kıyasla gelişmiş özellikler sunmaktadır. Artan yakıt maliyetleri ve hükûmet emisyon normları, otomobil endüstrilerini verimli ve daha hafif araçlar tasarlamaya yöneltmiştir. Otomotiv sektöründe, hafifletilmiş kompozitler ile üretilen otomotiv komponentleri yakıt tüketiminde kayda değer ölçüde azalma sağlamaktadır. Seramik partikül takviyeli alüminyum matris kompozitler, verimliliğin artması ve emisyon üzerinde iyi bir kontrolün yanı sıra aracın ağırlığını azaltmak için otomobil endüstrisindeki daha ağır metal malzemelerin yerini almak için büyük bir potansiyel göstermektedir [27]. Aracın toplam ağırlığını %15-40 oranında azaltmak için kompozit yapılar kullanılır. Titanyum Karbür (TiC), Silisyum Karbür (SiC), Bor Karbür (B_4C), Karbon Nanotüpler (CNT), Gr (Grafit) ve alümina (Al_2O_3), AMC'lerin mekanik özelliklerini önemli derecede geliştirmek için kullanılan takviyelerdir. Geleneksel alüminyum alaşımları ile karşılaştırıldığında

alüminyum matrislerden oluşan kompozit malzemelerin avantajları; daha fazla sertlik ve dayanıklılık, yüksek sıcaklıklarda gelişmiş özellikler, hafiflik, artan elektriksel iletkenlik, kontrollü termal genleşme katsayısı ve geliştirilmiş aşınma direncidir [28]. Çeşitli takviye malzemeleriyle gelişen Hibrit Alüminyum Matris Kompozitler (HAMC'ler) üzerinde çok sayıda araştırma yapılmıştır. Araştırmacılar, hibrit kompozitler ve tek takviyeli kompozitleri karşılaştırarak benzer ve gelişmiş özelliklerini belirlemişlerdir. Birçok araştırmacı, daha ucuz ve yüksek mekanik özelliklere sahip hibrit alüminyum içerikli HAMC'ler üzerinde çalışmalar yapmaktadır. Literatürde, SiC/Gr içerikli mukavemeti artırılmış AMC'lerin mekanik ve morfolojik özellikleri incelenmiştir. Sıvı metalürjisi, kompozit imalatı için kullanılan tekniktir [29].

E-cam kısa elyaflarından oluşan yeni bir hibrit kompozit grubu geliştirilmiştir. Mikroyapı incelemesinde taneciklerin homojen dağılımı ortaya çıkmış ve çekme dayanımında yaklaşık %32 artış ve sertlikte iki kat artış gözlenmiştir. %10 Al_2O_3 ve değişken ağırlık %'si grafit partikülleri içeren Al hibrit kompozitlerini inceleme sonuçlarına göre Grafit yüzdesinin artması ile birlikte kompozit sertliğinde önemli bir azalma olduğu görülmüştür. Abdul Saheb, ağırlıkça 5 wt. %, 10 wt. %, 15 wt. %, 20 wt. %, ve 25 wt. % ve 30 wt. % oranında SiC parçacıkları ile ağırlıkça, 2 wt. %, 4 wt. %, 6 wt.%, 8 wt.% ve 10 wt.% grafit parçacıklarından oluşan Al bazlı hibrit kompozitler üzerine çalışmalar yapmıştır. Seramik partikül yüzdesi arttıkça kompozitin sertliği yükselmektedir. Hibrit Alüminyum Kompozitlerin çeşitli yüzde oranları ile yapılan çalışmanın SEM görüntüleri Şekil 5'te gösterilmiştir [30].



Şekil 5. *SEM görüntüleri. (a) %0 SiC+B_4C. (b) %5 SiC+B_4C. (c) % 10 SiC+B_4C. (d) %15 SiC+B_4C. (e) %20 SiC+B_4C [30].*

Hibrit Alüminyum Matris Kompozitler, çok sayıda uygulamada yaygın olarak kullanılmaktadır ve ileri mühendislik amaçları için mevcut malzeme gereksinimleri arasında köprü kurmuştur. Sert takviye parçacıkları ilave edilerek Hibrit Kompozitlerin mukavemeti arttırılabilir. Hibrit Kompozitlerin mekanik özellikleri; Bor Karbür, Alüminyum Nitrür, Silisyum Karbür ve Alümina vb bileşenler ilave edilerek geliştirilebilir [31].

D. BİYO-KOMPOZİTLER

Doğal elyaflar ısı ile sertleşme özelliğine sahiptir ve bu özelliği ile termoplastik komponentler ile birleştirilerek kompozit malzemeler elde edilebilir. Bu da cam/karbon elyaflarının ve ayrıca yüksek elektrik veya üretim gerektiren alüminyumun etkili bir ikamesi olarak görünür. Mevcut araştırmalarda yaygın olarak daha yüksek yapısal performans göstermeye yönelik çalışmalar yürütülmektedir. Mevcut endüstriyel araştırma, sürdürülebilirliğe yönelik, çevreyi korumaya odaklanan daha fazla teknolojik işleme izin veren çözümler öngörmektedir. 20. yüzyıldan beri, Doğal Elyaf Kompozitleri endüstrilerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bitkilerden elde edilen, keten (Linum Usitatissimum), kenevir (Cannabis Sativa) veya geri dönüştürülmüş malzemeler biyo kompozit malzemelerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Biyo-kompozitler, otomobil sektöründe ve çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır. Otomobillerin iç bölgelerinde, araç gövde ve çerçeve yapısında, e-bisikletlerde biyo-kompozitler sıklıkla kullanılmaktadır. Son zamanlarda, sürdürülebilir malzemeler geliştirmeye yönelik talebin artmasıyla birlikte keten liflerinin takviye olarak uygulanmasını artırmıştır. Takviye uygulaması, tek yönlü takviye elyafı ile sınırlı olmamakla birlikte, aynı zamanda örme takviye fazı olarak da kullanılabilir. Elyaf takviyeli kompozitler ile dokuma kompozitleri karşılaştırıldığında, dokuma kompozitler daha karmaşık olup yüksek mekanik özelliğe sahiptir. Doğal kompozitlerde (polipropilen, polilaktik asit) veya epoksi içerikli reçinelerde Keten lifleri kullanılmaktadır. Keten liflerinden yapılan termoset, termoplastik ve biyolojik olarak parçalanabilir matris içeren kompozitler daha iyi mekanik özellikler göstermektedir. Bilim insanları; kenaf ve jüt, kenevir vb. çeşitli doğal lifler veya hibrit biyo-kompozitleri yani jüt/kauçuk ve kenevir/saman vb. biyo-kompozitleri incelemişlerdir. Araştırmacılar tarafından, karbon/kenevir hibrit biyo-kompozitler gibi bir hibridizasyon daha gösterilmiştir. PLA/kenevir kompoziti için çeşitli biyo-bazlı kompozit örnekleri incelenmiştir. Biyo-kompozitler normal ve biyobazlı epoksi reçinelerden elde edilir. Otomotiv sektöründe, ses ve ısı yalıtımı ve ekonomik bir ürün için atık ve saf yün elyafların kullanımı ileriye dönük sürdürülebilir bir çözüm olabilir. Literatürde, yün bir elyaf türü olarak kabul görmektedir. Ayrıca, ağırlığının %30'una kadar su emerek arabanın içindeki nemi kontrol etme potansiyeline sahiptir [32].

D.1. Doğal Lifler ve Otomobil Uygulamaları

Doğal Elyaf Takviyeli Kompozitlerin (NFRC) uygulamalarının performansını artırmak için önemli araştırmalar yapılmıştır. Keten bitkisi lifi bazlı biyo-kompozit malzemeden yapılmış araç kaputunun yapısal tasarımı ve değerlendirilmesi üzerine bir çalışma yapılmıştır. Darbe testi sonuçları bu liflerin araç kaputu imalatına uygunluğunu ortaya koymaktadır. Bu lifler düşük ağırlıklı bileşenler ve daha iyi sıkıştırma özellikleri sağlar. Yedi doğal lif (jüt, hindistan cevizi, kenaf, keten, abaka, sisal, kenevir) üzerinde değişen nem koşullarına tabi tutulan numuneler üzerinde mekanik deneyler yapılmıştır. Bu elyaflardan elde edilen sonuçlar, otomobil uygulamalarında belirgin bir şekilde umut verici bir potansiyel göstermektedir. Araştırma ayrıca, liflerin alkalizasyonunun lif mukavemetine zarar verebileceğini ve düşük mekanik özelliklerle sonuçlanabileceğini ortaya koymaktadır. Caryota elyaf özellikleri üzerine yapılan araştırmalar, malzemenin otomotiv bileşenlerinin üretiminde kullanılabilmesi için daha iyi mekanik özelliklere sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Silanla işlenmiş Leucas Aspera (LA) bitki lifi takviyeli epoksi kompozit malzeme, mekanik (çekme ve eğilme) ve termal özelliklerdeki iyileşmeye örnek teşkil etmektedir [33].

Fren balatalarının hazırlanmasında kullanılan silan ile muamele adilmiş LA/epoksi kompozit, işlenmemiş elyaflara kıyasla daha yüksek kesme mukavemeti göstermektedir. Bu nedenle silan ile muamele edilmiş LA lifleri daha iyi performans gösterir ve hafifliğin öne çıktığı uygulamalarda kullanılabilir. Azadirachta indica bitki kabuğundan elde edilen lif incelenmiştir ve fiziksel, kimyasal özelliklerini değerlendirmiştir. Sonuçlar, bu liflerin özellikle otomotiv endüstrisindeki uygulamalarda kompozit malzemeler olarak kullanılmasının uygun olduğunu ortaya koymaktadır. Doğal keten lifine dayalı otomobil kaportası üzerinde gerçekleştirilen yapısal analiz, kompozit malzemenin oldukça güvenli, kararlı ve hafif olduğunu doğrulamaktadır. Hindistan cevizi ve epoksi reçine ile güçlendirilmiş karbon fiberden oluşan hibrit kompozit üzerinde yapılan mekanik testler, bisiklet kaskı kılıfı, araba zeminleri ve çatılarının imalatı için iki veya daha fazla elyaf kullanmanın daha uygun olduğunu göstermektedir. Enjeksiyon kalıplama yöntemiyle Polivinil Klorür (PVC) matrisinde işlenmiş Areca Kılıf (AS) elyafının kullanılması, AS/PVC kompozitinin otomobil ön panel üretimi için uygun ek malzeme olabileceğini göstermektedir. Jüt lifleri; ağırlık azaltma, yüksek hız, düşük güç tüketimi ve daha az eylemsizlik elde etmek için cam elyafların yerine kullanılması uygun olacaktır ve bir arabanın ön kaputunu imal etmek için kullanılabilecektir. Vinil ester matrisli kompozit malzeme ile güçlendirilmiş keten elyafı kullanılarak üretilen bir araç kaportasının tasarımı ve analizi üzerine yapılan bir araştırmada, vinil ester matrisli kompozit malzeme ile güçlendirilmiş keten

elyafı, çelik kaportaya kıyasla %30 daha az ağırlık göstermektedir. Farklı bir araştırmada; keten, sisal ve kenevir lifleri kullanılarak araba panolarının ve iç camların üretiminde Doğal Lifli Hibrit Plastiklerin (NFHP) kullanıldığı bildirilmiştir. Audi otomobil markası, kapı pervazı yapımında keten ve sisal lifleri kullanılmaktadır. Calotropis procera lifleri üzerinde yapılan testler, bu liflerin otomobil iç aksamlarının imalatı için iyi bir takviye olabileceğini göstermiştir. Saccharum bengalense bitki lifleri; araba çerçeveleri, pano tasarımı, tavan döşemeleri, zemin kaplaması, kutu rafları, paletler, yedek lastik kılıfları, koltuk arkalıkları ve diğer otomobil parçaları için kullanılması uygundur [33].

Cam elyafının kenevir elyafı ile hibridizasyonu üzerine yapılan başka bir çalışma, mükemmel darbe dayanımı ve sertliği ortaya çıkararak otomobil uygulamaları için elyafları daha uygun hale getirmektedir. Kenaf elyaflarının matrise yapışma özelliğini iyileştirmek için, istifleme sırası (tabaka tabaka), elyafların matrise hacim oranı, açısal konumu ve elyaf yüzeyinin kimyasal modifikasyonu gibi hususlar dikkate alınarak kompozit malzemelerin üretiminde kullanılmaktadır. Sonuçlar, kenaf bazlı kompozitlerin gösterge panelleri, kapı içleri ve döşeme altı bileşenleri gibi otomobil bileşenlerinde kullanılabileceğini göstermektedir. Silan ile işlenen desmostachya bipinnata lifleri, düşük ağırlıklı ve orta yüklü otomobil bileşen uygulamalarına kompozit malzemeler için kullanılmaktadır. Hafif bir otomobil uygulaması için, Epoksi Matris Hibrit Kompozit (HC) ile güçlendirilmiş sisal/kenaf elyaf kullanılan bir hibrit kompozit geliştirilmiştir. HC malzemesinin su emmesi üzerine yapılan çalışmada, HC malzemesi, tek tek elyaf kompozitlerle karşılaştırıldığında daha iyi nem emme kapasitesine sahip olduğu bulunmuştur. Otomotiv endüstrisi, otomobil üretiminde çevre dostu bir teknoloji elde etmek için doğal liflerden yararlanmaktadır. Sürdürülebilirlik, otomobil endüstrisinde de yeni iş fırsatları yaratmaktadır. Sonuç olarak, bu lifler çevresel olarak sürdürülebilir malzemelerde biyo lif olarak kullanılabilmektedir [33].

Mercedes-Benz A-Serisi modelinde yüksek oranda kompozit malzeme kullanımı sağlamak için yenilenebilir hammaddeler ve geri dönüştürülmüş plastik malzemeler kullanılmıştır. Sürgülü açılır tavanın çerçeve yapısında, geleneksel çelik sac çerçevenin yerini almak üzere, ısıyla sertleşen bir bağlama maddesiyle birlikte doğal bir elyaf hasır kullanılmıştır. Bu araç serisinde kullanılan kompozit malzemeler, ağırlığı neredeyse yarı yarıya azaltır. Mercedes-Benz araçlarında doğal elyaf kompozit parçalar Şekil 6'da gösterilmektedir. Bu modelde kapı panellerinde jüt elyaf takviyeli kompozitler, motor ve şanzıman kapaklarında keten, gövde altı panellerinde, tavan kaplamasında, arka yük bölümünde kenevir, sisal ve yün gibi diğer elyaflar kullanılmıştır [33].



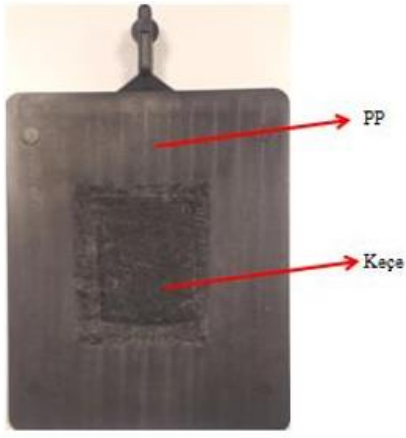
Şekil 6. *Mercedes-Benz A-serisi ve doğal elyaf kompozitlerden yapılmış parçaları [33].*

Henry Ford 1940'larda, kenevir elyafı kullanarak doğal elyaf kompozitlerini kullanarak ilk defa otomobil üretimi yapmıştır. Doğal elyaf bazlı kompozitler, hafif ve çevre dostu malzemelere olan talebin daha yüksek olması nedeniyle otomotiv endüstrisi için önemli bir potansiyele sahiptir. Araştırmalar, doğal elyaf kompozitlerin bir otomobil parçasının %20'lik bir maliyet azalmasına ve %30'luk bir ağırlık azalmasına katkıda bulunabileceğini göstermektedir. Kompozit bileşenlerinin hafifliği daha düşük yakıt tüketimine, daha iyi geri dönüşüm olanaklarına ve atık bertarafında azalmayı sağlamaktadır. Ağırlığı azaltılmış Kompozit bileşenler, araçta düşük yakıt tüketimi sağlamaktadır. Doğal elyaf kompozitler daha çok; gösterge paneli, kapı panelleri, bagaj rafları, koltuk minderleri ve kabin kaplamaları gibi iç kısımlarda kullanılırken, araç dış kısım parça uygulamalarında doğal elyaf kompozit parçalarının kullanımı çok sınırlıdır. Örnek olarak Şekil 7'de kenevir lifinden otomobiller için kapı üretimi gösterilmektedir [34].



Şekil 7. *Kenevir lifinden kapı içi kaplaması [34].*

Galsan Plastik ve Kalıp A.Ş. tarafından yüksek mukavemeti ve akustik özellikleri iyileştirmek amacıyla, PP–Keçeden oluşan hibrit yapıda ürün tasarlanmış ve bu ürünün plastik enjeksiyon yöntemi ile üretilebilirliği konusunda çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmada hedeflenen, tekerlek yuvası kaplaması ürününde mevcut olarak gerçekleştirilmiş olan ses izolasyonu ve yüksek mukavemet ile birlikte, ağırlık azaltılması ve maliyet kazancı sağlayarak çevreye ve kullanıcıya kazanım oluşturmaktır. Galsan Plastik ve Kalıp A.Ş. tarafından geliştirilen Hibrit PP-Keçe prototip ürün görüntüsü Şekil 8'de gösterilmektedir [35].



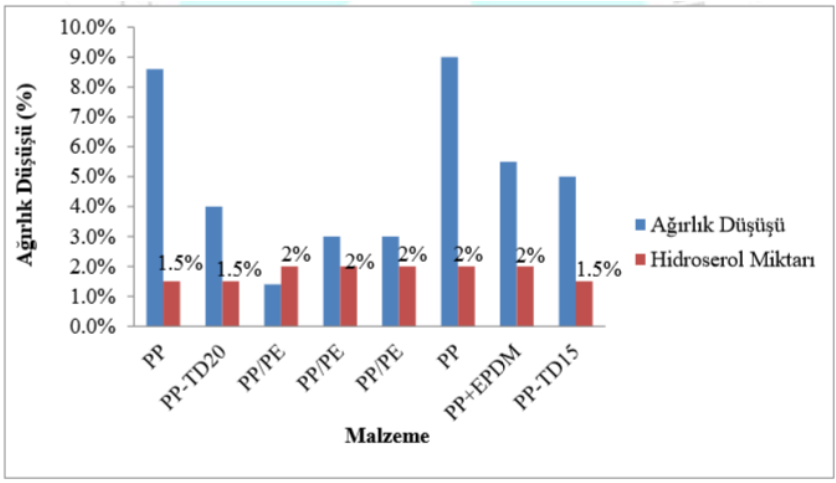
Şekil 8. *Hibrit PP – Keçe ürün görüntüsü [35].*

Galsan Plastik ve Kalıp A.Ş. tarafından yapılan bir başka hibrit çalışmada, plastik enjeksiyon prosesi ile üretilen PP ana yapılı ürünlere ağırlıkça %1,5-2 oranında hidroserol katkısı ilave edilmiş ve homojen bir karışım elde edilmiş, köpürtme ajanının ürün kesit kalınlığı, malzeme, kullanılan Hidroserol oranı etkenleri göz önünde bulundurularak ürünlerdeki; ağırlık azaltma üzerine etkileri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, PP ana yapılı otomotiv uygulamaları için köpürtme ajanının katılması ile en uygun enjeksiyon prosesi yöntemine katkıları incelenmiştir. Çalışmada, 1,5–3,5 mm aralığında kesit kalınlıklarına sahip, talk katkılı PP, ana yapı malzemesi katkısız PP, polietilen içerikli PP (PP/PE) ve EPDM katkılı PP (PP+EPDM) olan 8 farklı numuneye, %1,5-2 oranında Hidroserol köpürtme ajanı ilave edilmiştir. Tablo 1'de; kesit kalınlığı, malzeme türü ve Hidroserol ajanının ağırlıkça miktarı verilmiştir [36].

Malzeme No	Malzeme	Kesit Kalınlığı (mm)	Hidroserol Miktarı
1	PP	3,5	1,5 %
2	PP-TD20	2,5	1,5 %
3	PP/PE	1,5	2%
4	PP/PE	2,3	2%
5	PP/PE	2,5	2%
6	PP	3,0	2%
7	PP/EPDM	2,0	2%
8	PP-TD15	2,3	1,5 %

Tablo 1. *Numunelere ait malzeme, hidroserol kullanım miktarı ve kalınlık bilgileri [36].*

Galsan Plastik ve Kalıp A.Ş. tarafından gerçekleştirilen çalışmalar sonucunda PP ana içerikli malzemeler kullanılan tüm numuneler için ağırlık düşüşü Şekil 9'da gösterilmiştir.

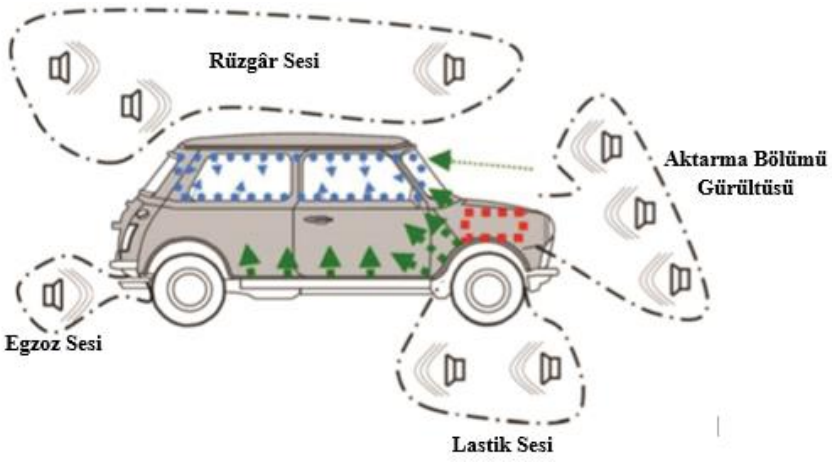


Şekil 9. *PP bazlı malzemelerde köpürtme ile ağırlık düşüşü [36].*

E. ARAÇLARDA SES VE TİTREŞİM

Araçların gürültü, titreşim ve sertlik değerlerinin birleşimi kullanıcıya o araç hakkında bir bilgi vermektedir. Bu bilgi araç kullanıcıları için oldukça belirleyicidir. Titreşen ve ses çıkaran bir araba kullanmak yorucu ve rahatsız edicidir. Gürültü, titreşim ve kullanım sertliğinden oluşan bu araç değerlendirme olgusuna NVH (Gürültü, Titreşim ve Sertlik) denir. Uzun yolculuklarda, iyi bir NVH performansı, konforu büyük ölçüde artırdığından en güçlü marka farklılıklarından biridir. Bir motordan gelen titreşim enerjisi, motor yataklarından sac yapıya ve sonunda araba koltuğu ve direksiyon simidinden sürücüye gitmektedir [37]. Bu nedenle bu faktörleri optimize etmek son derece önemlidir. Otomotiv endüstrisinde son yıllarda artan rekabet ile birlikte otomotiv firmaları, araştırma geliştirme bölümlerindeki mühendislik ekibiyle bu konuda ciddi çalışmalar yürütmektedir. Taşıtın en önemli ses ve titreşim kaynağı öncelikle motor ve güç aktarım bölümleridir. Güç aktarma organları ve metal yapı gürültüsü başarılı bir şekilde azaltıldığından, lastik/yol gürültüsü genel iç sessizlik oluşturmak için daha önemli hale gelmiştir. Yol gürültüsü genellikle 50 km/s'nin üzerindeki araç hızlarında fark edilmeye başlar, ancak toplam iç gürültüye katkısı genellikle 50-100 km/s arasındadır [38]. Yol gürültüsü, lastik ve yol yüzeyi arasındaki etkileşimden kaynaklanır ve gürültü hem yapısal olarak hem de hava yoluyla araca taşınmaktadır. 80 km/s üzerindeki hızlarda, rüzgar sesi nispeten daha belirgin olmaktadır ve yolcular için fark edilir hale gelmektedir. Hareket halindeki bir aracın içini etkileyen sesler ve araçtan kaynaklanan ses ve titreşimler Şekil 10'da verilmiştir. Burada dikkat çekici olan, aracın motor bölümü gürültüsünün ön camdan araç

içine girebilmesidir. Aracın ön koltuğunda oturan bir kişi için, motor bölümünden gelen seslere öncelik verilmektedir. Daha sonra tekerleklerden ve egzoz sisteminden yapısal olarak gelen sesler dikkate alınmaktadır. Aynı zamanda havanın motor ve şanzıman bölümlerinin taşıdığı sesler ile havanın taşıdığı yol ve rüzgar sesleri de dikkate alınmaktadır [39].



Şekil 10. *Aracın içine geçen sesler [39].*

F. 1. Araçlarda Ses Yalıtımı, Soğurma ve Ses Yalıtım Malzemelerinin Geliştirilmesi

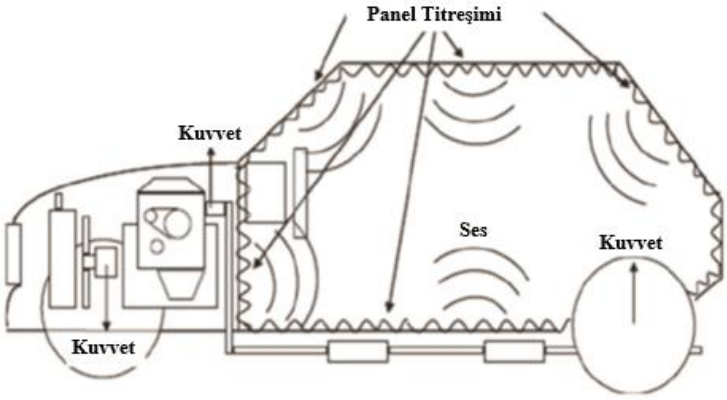
Araçların sağlam yapılarının araştırılması eski çağlara kadar uzansa da hızla gelişen ve değişen otomotiv endüstrisinde son yıllarda yapılan çalışmalar daha önemli bir yer tutmaktadır. Teknolojinin gelişmesiyle birlikte konfor beklentisi arttıkça araçların daha sessiz olması beklenmektedir. Bu sessizlik sadece araç içinde değil, araç dışında da önemlidir. Çevreye yayılan araç gürültüsü çevre kirliliği oluşturduğundan bu konuda önlemler alınmakta ve çevreye duyarlı ülkeler tarafından çeşitli yönetmelikler çıkarılmaktadır. Avrupa Birliği'nin 6 Şubat 1970 tarihinde aldığı ''Motorlu taşıtların ve römorkların tip onayına ilişkin üye devletlerin kanunlarının birbirine yaklaştırılması''na ilişkin ilk kararla birlikte, topluluk içinde üretilen ve kullanılan taşıtlar için bir belirli standart oluşturulmuştur. Daha sonra buna fosil yakıtların neden olduğu hava kirliliği ve gürültü kirliliğinin de eklendiği birçok karar alınmıştır. Son olarak Avrupa Birliği parlamentosu 2014 yılında aldığı 540/2014 sayılı kararla çevresel gürültü kirliliği için araç motor gücünü, ağırlığını ve tipini dikkate alan ''Pass By Noise'' adı altında bir yönetmelik çıkarmıştır [40].

Yapılan düzenlemeler ve konfor beklentileri sonucunda araçlarda yalıtım malzemelerinin kullanımı artmıştır. Araç ağırlıkları ve maliyetleri göz önüne alındığında, bu beklentileri karşılamak için daha hafif ve akustik performansı yüksek yalıtım malzemeleri sürekli olarak geliştirilmektedir. Yeni model araçların altları artık hafif, suya ve dış ortama dayanıklı tekstil esaslı malzemelerle kaplanmaktadır. Bazı araçlar, araç çamurluklarının iç kısımlarında plastik çamurluk iç kaplamaları yerine aynı tekstil malzemesinin daha dayanıklı türlerini kullanmaya başlamıştır. Yol ve tekerleklerin sesini absorbe eden bu yalıtım malzemeleri, bu seslerin araca girmesini engellerken, araçtan gelen motor sesini absorbe ederek ses emisyonunu istenilen seviyelerde tutmaktadır. Tekstil bazlı, çamurluk kompozit yalıtkan malzeme, tekerleklerden kaynaklanan yol gürültüsünü absorbe eder ve ses emisyonunu azaltmaktadır [40].

Yalıtım malzemelerin araçlarda kullanımı, bölgelere göre malzeme seçimi, bölgelere göre akustik özellikleri ve beklentiler konusunda literatürde birçok çalışma yapılmıştır. Araçlarda bulunan ses yalıtımı ve ses absorbe edici malzemeler aynı zamanda ısı yalıtımı da sağlamaktadır. Daha iyi yalıtılmış bir aracın akustik performansını artırmaktan çok enerji tasarrufu sağlayacağı için ısı yalıtım değerleri dikkate alınmıştır. Araç içi, kış sürüşü sırasında ısıtma durumunda iç sıcaklık geleneksel yalıtımdan 7,70 ℃ daha yüksektir. Aynı koşullar altında, iklimlendirme ve ısıtma için gereken süre azalır ve özellikle araç içi sıcaklık ayarlaması için kullanılan elektrik enerjisinin azalması, sürüş için mevcut enerjinin artması anlamına gelmektedir. Değişen dünyamız ile birlikte araç içi konfor beklentilerindeki artıştan dolayı ses yalıtım malzemelerine talep artmıştır. Yalıtım malzemeleri üreten firmalar, yüksek akustik özellik gösteren yalıtım malzemeleri geliştirmeye yönelmişlerdir [41].

Son yıllarda otomobillerde bulunan ağır eski parçalar yerine daha hafif ve daha yüksek performanslı yeni parçalar kullanılmaktadır. Çamurluklarda ve aracın altında, ağır plastik malzemeler yerine daha hafif ve dayanıklı kompozit esaslı parçalar kullanılmaktadır. Parçalar, plastik malzemelerden tekstil esaslı kompozit malzemelere dönüştüğünde akustik performansları da artmaktadır. Bu malzemelerin kullanımı ile plastik parçaların arkasına monte edilen bazı tekstil veya poliüretan köpük esaslı akustik parçaların kullanımı da ortadan kaldırılmıştır. Araç motor bölgesinde akustik ve ısıl direnci artırılmış poliüretan köpük parçaların kullanımı gün geçtikçe yaygınlaşmaktadır. Motor bölgesi için kaput altı parçası yalıtımında kullanılabilecek birçok malzeme çeşitli ağırlık ve kalınlıklarda test edilerek çeşitli deneyler ve çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalarda yüksek kaliteli poliüretan köpükler ısıya dayanıklı polimerler oldukları için ön plana çıkmıştır. Bu sayede motor bölgesinde sıcaklığa, yangına ve diğer dış etkilere dayanıklı,

çok hafif, termal olarak şekillendirilmiş ve ses absorplama değerleri çok yüksek olan poliüretan köpükler geliştirilmiştir. Poliüretan köpükler kendilerinden en az 3-7 kat daha ağır olan cam yünü, taş yünü, fenolik keçe gibi malzemelere göre çok daha iyi akustik performans gösterirler. Araç üzerinde ses ve titreşim bölgeleri Şekil 11'de gösterilmektedir [42].



Şekil 11. *Ses ve titreşim iletimi [42].*

IV. SONUÇ

Yapılan araştırmalara göre kompozit malzemeler otomotiv sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu malzemeler, Fiber (Elyaf) Takviyeli Kompozitler (FRP), Karbon Elyafla Güçlendirilmiş Kompozitler (CFRC) ve Cam Elyaf ile Güçlendirilmiş Plastikten (GRP) oluşan kompozit türleri araç ağırlık azaltma çalışmalarında yaygın olarak kullanılanlardandır. Literatür verilerine göre kompozitler; otomobil, uçak, denizcilik ve demir yolu gibi araçlarda ve yük taşıyan yapılarda kullanılmakla beraber bina inşaatlarında da kullanılmaktadır. Aracın ağırlığını %10 oranında azaltmak için, Karbon Elyaf Takviyeli Kompozit, plakaların metal levhaların yerine, yeterli sertlik ve yüksek mekanik özelliklere sahip alternatif hafif malzeme olarak kullanımı önerilmektedir. Yapılan araştırma sonuçlarına göre kompozitler; araç gövde yapıları, tavan yapıları ve tamponlar gibi çeşitli gelişmekte olan metal bileşiklerin yerine kullanılması avantaj sağlamaktadır. CFRP, alüminyum ve çelik gibi geleneksel metallerle karşılaştırıldığında, yerine göre daha yüksek ağırlık azaltma kapasitesi, yüksek özgül dayanım, yüksek darbe dayanımı ve sertlik vb. üstün özellikler göstermektedir. Literatür çalışmalarına göre; aracın ağırlığında yaklaşık %60 oranında kayda değer bir azalma elde etmek için, çeliğin CFRP kompozit ile ikame edilmesi gerekmektedir [20].

Karbon elyaf malzeme, çarpışmaya karşı daha yüksek dayanım özelliği olduğunu göstermiştir. Wazeera ve ark. aracın belirli konumlarında yalnızca 4.27 kg kırpılmış karbon elyafın kullanılmasıyla elde edilen CFRC kompozit parçaların 35 mph (56.3 km/saat) hızla bir çarpışma sırasında yolcunun güvenliğini sağlamak için yeterli olduğunu tespit etmişlerdir [21]. İncelemeler; CFRP'nin aracın çelik gövde yapısı, tekerlek jantları, tampon destekleri, araba çatıları, kapı modülleri, hava emme manifoldu sistemleri ve bagaj kapakları vb. parçaları için potansiyel olarak kullanılabileceğini göstermektedir.

Metal matrisli kompozitler; uçakların kanat panellerinde, uydu ve uzay araçlarında, fren kanpanasında, piston gövdesinde, türbin kanatları vb. alanlarda kullanılabilmektedir. Uçakların kanat panellerini yapmak için SiC ile güçlendirilmiş alüminyum uygulaması literatürde mevcuttur. Magnezyum matrisli kompozitler, grafit lifleri ile birlikte uydu ve uzay yapılarında kullanılmaktadır. Titanyum alaşımları yüksek mukavemet gereken kompozitlere ihtiyaç olduğu endüstrilerde aktif olarak kullanılmaktadır. Nikel bazlı kompozit malzemeler, mevcut alaşımlardan daha yüksek mekanik özelliklere sahip olduğu için türbin kanatlarının imalatında kullanılmaktadır. Havacılık ve otomobil endüstrilerinde, yüksek mekanik özelliklerinden dolayı, AMC (Alüminyum Matris Kompozitler) sıklıkla kullanılmaktadır. Otomotiv endüstrisinde, yakıt tüketiminde azalma sağlamak amacıyla hafif kompozitler kullanılmaktadır. Seramik parçacık takviyeli alüminyum matris kompozitler, verimliliğin artması ve emisyon üzerinde iyi bir kontrolün yanı sıra aracın ağırlığını azaltmak için otomobil endüstrisindeki daha ağır metal içerikli malzemelerin yerini almak için büyük bir potansiyel göstermektedir. Yapılan araştırmalarda, hafif metal matrisli kompozitlerin kullanımı, aracın toplam ağırlığını %15-40 oranında azaltabileceği gösterilmiştir. AMC'lerin tribolojik ve mekanik özelliklerini geliştirmek için, sıklıkla kullanılan takviyeler, Alüminyum (Al_2O_3), Silisyum Karbür (SiC), Bor Karbür (B_4C), Titanyum Karbür (TiC), Grafit (Gr) ve Karbon Nanotüpler (CNT)'dir. Seramik partikül takviyeli alüminyum matris kompozitler, verimliliğin artması ve emisyon üzerinde iyi bir kontrolün yanı sıra aracın ağırlığını azaltmak için otomobil endüstrisindeki daha ağır metal içerikli malzemelerin yerini almak için büyük bir potansiyel göstermektedir.

Keten bitkisi lifi bazlı biyo-kompozit malzemeden yapılmış araç kaputunun yapısal tasarımı ve değerlendirilmesi üzerine bir çalışma yapılmıştır. Darbe testi sonuçları bu liflerin araç kaputu imalatına uygunluğunu ortaya koymaktadır. Yedi doğal lif (jüt, hindistan cevizi, kenaf, keten, abaka, sisal, kenevir) üzerinde değişen nem koşullarına tabi tutulan numuneler üzerinde mekanik deneyler yapılmış-

tır. Bu elyaflardan elde edilen sonuçlar, otomobil uygulamasında belirgin bir şekilde umut verici bir potansiyel göstermektedir. Polivinil Klorür (PVC) matrisinde işlenmiş Areca Kılıf (AS) elyafının kullanılması, enjeksiyon kalıplama yöntemiyle AS/PVC kompozitinin otomobil ön panel üretimi için uygun ikame malzeme olabileceğini göstermektedir. Jüt lifleri; ağırlık azaltma, yüksek hız, düşük güç tüketimi ve daha az eylemsizlik elde etmek için cam liflerinin yerini alacak bir arabanın ön kaputunu imal etmek için kullanılmaktadır. Hafif bir otomobil uygulaması için Epoksi Matris Hibrit Kompozit (HC) ile güçlendirilmiş sisal/kenaf elyaf kullanan bir Hibrit Kompozit geliştirilmiştir. HC malzemesinin su absorbe etmesi üzerine yapılan çalışmada, HC malzemesi, tek tek elyaf kompozitlerle karşılaştırıldığında daha iyi nem absorbe etme kapasitesine sahiptir. Otomotiv endüstrisi, otomobil üretiminde çevre dostu bir teknoloji elde etmek için doğal liflerden yararlanmaktadır.

TEŞEKKÜR: Bu çalışmanın hazırlanmasında desteğini esirgemeyen Galsan Plastik ve Kalıp A.Ş. Genel Müdürü Sn. Taner Öner'e teşekkürlerimi borç bilirim.

V. KAYNAKLAR

[1] A. Kumar, S. Lal, S. Kumar, "Fabrication and characterization of A359/Al_2O_3 metal matrix composite using electromagnetic stir casting method," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 2, no. 3, pp. 250-254, 2013.

[2] H. Singh, G. S. Brar, H. Kumar, V. Aggarwal, "A. review on metal matrix composite for automobile applications," *Materials Today: Proceedings*, vol.43, pp. 320-325, 2021.

[3] D. Thongsoon, C. Abeykoon, I. Vera Marun, J. Potluri, P. Polrut, W. B. Boonliang, "Comparison of mechanical properties of carbon fibre and kaolin reinforced polypropylene composites," *In 7th World Congress on Mechanical*, Chemical, and Material Engineering, 2021.

[4] D. B. Miracle, "Metal matrix composites from science to technological significance," *Composites Science And Technology*, vol. 65, no. 15-16, pp.2526-2540, 2005.

[5] S. Divagar, M. Vigneshwar, S. T. Selvamani, "Impacts of nano particles on fatigue strength of aluminum based metal matrix composites for aerospace," *Materials Today Proceedings*, vol. 3, no.10, pp. 3734-3739, 2016.

[6] H. Ahmad, A. A. Markina, M. V. Porotnikov, F. Ahmad, "A review of carbon fiber materials in automotive industry," *In IOP Conference Series Materials Science And Engineering*, vol. 971, no. 3, pp. 032011, 2020.

[7] N. Fantuzzi, M. Bacciocchi, D. Benedetti, J. Agnelli, "The use of sustainable composites for the manufacturing of electric cars," *Composites Part C Open Access*, vol. 4, pp. 100096, 2021.

[8] M. White, "Showcasing successful high volume application of aluminium into body in white demonstrating weight saving opportunities using aluminium," *Global Automotive Lightweight Materials Conference*, London, UK, 2013, ss. 24-25.

[9] S. Frost, A. Sullivan, "Global analysis of weight reduction strategies of major OEMs," *Market Engineering Research*, 2009.

[10] D. Jasinski, J. Meredith, K. Kirwan, "A comprehensive review of full cost accounting methods and their applicability to the automotive industry," *Journal of Cleaner Production*, vol. 108, no. A pp. 1123-1139, 2015.

[11] E. Ghassemieh, "Materials in automotive application, state of the art and prospects," *New Trends And Developments In Automotive Industry*, vol. 20, pp. 365-394. 2011.

[12] P. Bhatt, A. Goe, "Carbon fibres production, properties and potential use," *Material Science Research India*, vol. 14, no. 1, pp. 52-57, 2017.

[13] Z. Yanrong, H. Ping, L. Jicai, “Application of Carbon Fiber Composites in the Automotive industry,” *China Synthetic Resin And Plastics*, vol. 32, pp. 95-8, 2015.

[14] M. K. Egbo, “A fundamental review on composite materials and some of their applications in biomedical engineering,” *Journal of King Saud University Engineering Sciences*, vol. 33, no. 8, pp. 557-568, 2020.

[15] D. Thongsoon, C. Abeykoon, I. J. Vera-Marun, P. Potluri, W. Polrut, B. Boonliang, “Comparison of mechanical properties of carbon fibre and kaolin reinforced polypropylene composites,” *In 7th World Congress On Mechanical*, Chemical, And Material Engineering, Prague, Czech Republic, pp. 301, 2021.

[16] R. M. Wang, S. R. Zheng, Y. P. G. Zheng, “Polymer matrix composites and technology,” *Composites and Engineering*, 1rd ed, Cambridge, United Kingdom, Woodhead Publishing, 2011, pp. 568.

[17] J. Zhu, C. Abeykoon, N. Karim, “Investigation into the effects of fillers in polymer processing,” *Int j Lightweight Mater Manufact*, vol. 4, no. 3, pp. 370–82, 2021.

[18] S. Karuppannan Gopalraj, T. Kärki, “A review on the recycling of waste carbon fibre/glass fibre-reinforced composites fibre recovery, properties and life-cycle analysis,” *Sn Applied Sciences A Springer Nature Journal*, vol. 2, no. 433, 2020.

[19] F. C. Campbell, *Structural composite materials*, 1rd ed., United States of America, ASM International, 2010, pp. 612.

[20] F. Shao Yun, H. Xiao, Y. Chee Yoon, “Effects of fiber length and orientation distributions on the mechanical properties of short-fiber-reinforced polymers,” *J Soc Mater Sci*, vol. 5, no. 2, pp. 74–83, 1999.

[21] A. Wazeera, A. Dasb, C. Abeykoonc, A. Sinhad, A. Karmakare, “A review composites for elektric vehicles and automotive sector,” *Journal Pre-Proof*, vol. 2, no. 1, pp. 2773-1537, 2023.

[22] A. Albert, W. Zom, M. Layer, W. G. Drossel, D. Landgrebe, L. Kroll, W. Nendel, “Smart Process Combination for Aluminum/Plastic Hybrid Components,” *Technologies for lightweight structures*, vol. 1, no. 2, pp. 44-53, 2017.

[23] S. Gülmez, “Otomotiv endüstrisinde kullanılan polimer matrisli kompozit malzemeler,” Yüksek Lisans Projesi, Makine Mühendisliği, Pamukkale Üniversitesi, Denizli, Türkiye, 2018.

[24] J. W. Kaczmar, K. Pietrzak, W. Włosinski, “The production and application of metal matrix composite materials,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 106, no. 1-3, pp. 58–67, 2000.

[25] M. M. Nor, C. S. Ho, F. N. A. Janudin, "An experimental study on the deformation behaviour and fracture mode of recycled aluminium alloy AA6061 reinforced alumina oxide undergoing high velocity impact," *Archive Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers Part C Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 203-210, no. 234, pp. 1989-1996, 2020.

[26] G. Singh, S.L.I. Chan, N. Sharma, "Parametric study on the dry sliding wear behaviour of AA6082–T6/TiB_2 in situ composites using response surface methodology," *Journal of The Brazilian Society of Mechanical Sciences And Engineering*, vol. 40, no. 6, pp. 1–12, 2018.

[27] M. Patel, B. Pardhi, S. Chopara, M. Pal, "A review lightweight composite materials for automotive," *International Research Journal of Engineering And Technology*, vol. 05, no. 11, pp. 2395-0072, 2018.

[28] B. Ravishankar, S. K. Nayak, M. A. Kader, "A review hybrid composites for automotive applications" *Journal of Reinforced Plastics And Composites*, vol. 38, no. 18, pp. 835–45, 2019.

[29] J. R. Davis, "Light metals and alloys-aluminum and aluminum alloys," *Alloy Underst Basics*, vol. 10, pp, 351–416, 2001.

[30] G. Singh, S. Goyal, "Microstructure and mechanical behavior of AA6082-T6/ SiC/B_4C-based aluminum hybrid composites," *Particulate Science And Tecnology*, vol. 36, no. 2 pp. 154–61, 2018.

[31] A. Kumar, R. S. Rana, R. Purohit, "Synthesis analysis of mechanical and tribological behaviour of silicon carbide and graphite reinforced aluminium alloy hybrid composites," *Materials Today Proceedings*, vol. 26, no. 6, pp. 3152-3156, 2020.

[32] F. Pinto, L. Boccarusso, D. D. Fazio, S. Cuomo, M. Durante, M. Meo, "Carbon hemp bio hybrid composites effects of the stacking sequence on flexural, damping and impact properties," *Compos Struct*, vol. 242, pp. 112148, 2020.

[33] N. Venkatesh, K. Mohan, K. Vijayananda, "A review on natural fiber composite materials in automotive applications," *Engineered Science*, vol. 18, pp. 1-10, 2022.

[34] P. Peças, H. Carvalho, H. Salman and M. Leite, "Review natural fibre composites and their applications," *Journal of Composites Science*, vol. 2, no. 66, 2018.

[35] T. Araz, H. Şamlı, "Keçe ve Polipropilen Malzemeli Hibrit Ürün Tasarımı ve Optimizasyonu," 2. International Sciences and Innovation Congress, Ankara, 2021.

[36] M. Çulha, F. Bedir ve H. Şamlı. "Hidroserol Kimyasal Katkı Maddelerinin Polipropilen Anayapılı Parçaların Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri Üzerine Bir Araştırma," 3. Uluslararası Uygulamalı Bilimler Kongresi'nde sunuldu, Konya, 2020.

[37] A. Öner, S. Yalçınkaya, "Usage areas of acoustic polyurethane foam in vehicles and its contribution to weight reduction," *Internatinonal Innovative Approaches In Engineering Technology*, vol. L158, no. 540, pp. 131-195, 2014.

[38] G. Cerrato, "Automotive sound quality powertrain, road and wind noise," *Sound Vibration*, vol. 43, no. 4, pp. 16-24, 2009.

[39] H. Hiroyuki, K. Hiroyasu, "A new objective evaluation method of wind noise in a car based on human hearing properties," *Acoustical Acience And Technology*, vol. 23, no. 1, pp. 17-24, 2002.

[40] A. M. Aldhahebi, H. J. Junoh, A. Ahmed, "A review on the major sources of the interior sound vibration and riding comfort in vehicles," *AIP Conference Proceedings*, vol. 1775, no. 1, pp. 030039, 2016.

[41] S. W. Baek, S. W. Lee, C. S. Kim, "Experimental verification of use of vacumm insulating material in electric vehicle headliner to reduce thermal load," *Applied Sciences*, vol. 9, no. 20, pp. 4207, 2019.

[42] M. Bilova, E. Lumnitzer, "Advanced techniques used for acoustical parameters determination of sound absorbers," *Annals of Faculty Engineering Hunedoara International Journal of Engineering*, no. 1, pp. 1584-2665, 2011.

BÖLÜM 38

Kuantum Kriptografi: Tarihi, Temelleri ve Geleceği

Melike Karatay [1] & Onur Uğurlu [2]

[1] Fen Fakültesi, Ege Üniversitesi, İzmir, TÜRKİYE, ORCID: 0000-0001-6941-4752
[2] Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, İzmir Bakırçay Üniversitesi, İzmir, TÜRKİYE
ORCID: 0000-0003-2743-5939

GİRİŞ

Kuantum kriptografi, kuantum mekaniği ile bilgi güvenliğinin kesişiminde yer alan ve güvenli iletişim için yenilikçi bir yaklaşım sunan bir disiplindir. Polinom zamanda çözülemeyen matematiksel problemlerin zorluğuna dayanan klasik kriptografik yöntemlerin aksine, kuantum kriptografi, süperpozisyon ve dolanıklık gibi kuantum mekaniğinin temel prensiplerini kullanarak teorik olarak kuantum sonrası dönemde de güvenlik sunar. Bu paradigma değişimi, kuantum bilgisayarların birçok klasik şifreleme yöntemini etkisiz hale getirme tehdidini artırdığı bir dönemde özellikle kritik bir öneme sahiptir (Shor, 1994; Grover, 1996).

Kuantum kriptografinin temelini Kuantum Anahtar Dağıtımı (Quantum Key Distribution - QKD) oluşturur. QKD, iki tarafın ispatlanabilir güvenli bir şekilde ortak bir gizli anahtar oluşturmasına olanak tanıyan bir yöntemdir. 1984 yılında Bennett ve Brassard tarafından sunulan öncü BB84 protokolü, kuantum durumlarının özüne dayalı olarak herhangi bir dinleme girişiminin tespit edilmesini sağlayan yöntemlerin pratikte nasıl uygulanabileceğini göstermiştir (Bennett and Brassard, 1984). O zamandan bu yana, dolanıklık temelli iletişim ve cihazdan bağımsız yaklaşımlar gibi protokolleri kapsayan birçok ilerleme bu alanı genişletmiştir.

Kuantum kriptografinin en çekici avantajlarından biri, hesaplama saldırılarına karşı dayanıklılığıdır. RSA (Rivest, Shamir ve Adleman) ve eliptik eğri kriptografisi gibi klasik kriptografik sistemler, tamsayı çarpanlara ayırma veya ayrık logaritma gibi problemlerin polinom zamanda çözülemeyeceği varsayımına dayanmaktadır. Ancak, Shor algoritması gibi kuantum algoritmaları, bu problemleri verimli bir şekilde çözme yeteneğine sahiptir ve bu da klasik sistemlerin güvenliğini ciddi şekilde tehdit etmektedir (Shor, 1994). Buna karşılık kuantum kriptografi, güvenliğini sadece hesaplama varsayımlarına değil fizik yasalarına dayandırarak geleceğe yönelik sağlam bir çözüm sunmaktadır.

Teorik güvenlik iddialarına rağmen kuantum kriptografinin pratik uygulaması önemli zorluklarla karşı karşıyadır. Bu zorluklar arasında kuantum cihazlarının yüksek maliyeti ve karmaşıklığı, yan kanal saldırılarına duyarlılık ve uzun mesafeli anahtar dağıtımındaki sınırlamalar yer almaktadır. Mevcut araştırmalar, bu engelleri aşmak için kuantum tekrarlayıcılar, entegre fotonik teknolojiler ve hata düzeltme yöntemlerindeki ilerlemelere odaklanmaktadır (Pirandola ve diğerleri, 2020). Ayrıca, kuantum kriptografinin kuantum internet gibi mevcut teknolojik altyapılara entegrasyonu, yaygın benimseme yolunda kritik bir adım olarak görülmektedir (Kimble, 2008).

Bu çalışma, kuantum kriptografinin tarihsel gelişimini takip ederek, temel protokolleri ve teknolojileri inceleyip bilgi güvenliği alanını yeniden şekillendirme potansiyelini tartışarak kapsamlı bir genel bakış sunmayı hedeflemektedir.

KUANTUM KRİPTOGRAFİNİN TARİHSEL GELİŞİMİ

Kuantum kriptografinin yolculuğu 1980'lerin başlarında kuantum mekaniği ile güvenli iletişim sistemlerine duyulan ihtiyacın birleşmesiyle başladı. Bu alan, temel teorik önerilerden pratik uygulamalara ve küresel araştırma çabalarına kadar yıllar içinde önemli ölçüde gelişim göstermiştir.

Kuantum kriptografi kavramı, 1984 yılında Bennett ve Brassard'ın BB84 protokolünü önerdikleri dönüm noktası niteliğindeki makalelerinde resmen tanıtılmıştır (Bennett & Brassard, 1984). Bu protokol, güvenli anahtar dağıtımı için kuantum mekaniğini kullanan ilk pratik yöntem olmuştur. Kuantum belirsizlik ve ölçüm ilkelerine dayanan BB84, kuantum durumlarının iletimi sırasında herhangi bir dinleme girişiminin bu durumları bozacağını ve tarafların müdahaleyi tespit etmesine olanak sağlayacağını göstermiştir.

BB84'ün hemen ardından Ekert, kuantum dolanıklığına dayalı yeni bir yaklaşım önermiştir (Ekert, 1991). Bu dolanıklık tabanlı protokolde, anahtar dağıtımının güvenliği dolanık parçacıklarda gözlemlenen istatistiksel korelasyonların yerel gizli değişken teorileriyle açıklanamayacağını öne süren Bell teoremi üzerine inşa edilmiştir. Ekert'in çalışması, kuantum kriptografinin teorik temellerini genişletmiş ve dolanık foton çiftlerini kullanarak daha güçlü güvenlik garantilerinin sağlanabileceğini ortaya koymuştur.

İlk teorik protokoller, pratik zorlukları ele almak için bir dizi iyileştirme ve ilerlemeye zemin hazırlamıştır. Araştırmacılar, gürültü, kayıplar ve uygulama kusurları gibi zorluklara çözüm getiren yeni yöntemler geliştirmiştir. Örneğin, Hwang tarafından geliştirilen decoy state yöntemi, foton sayısı bölme saldırılarına karşı QKD'nin dayanıklılığını artırmıştır (Hwang, 2003). Ayrıca, cihazdan bağımsız kuantum anahtar dağıtımı (Device-Independent QKD - DI-QKD), kuantum cihazlarına olan güveni azaltarak sistemleri yan kanal saldırılarına karşı daha güvenli hale getirmiştir (Masanes ve diğerleri, 2011).

Teoriden pratiğe geçiş, 1990'larda laboratuvar ortamlarında yapılan deneylerle başlamıştır. 1992 yılında BB84'ün ilk deneysel uygulaması gerçekleştirilmiş ve bu protokolün kontrollü koşullarda uygulanabilir olduğu doğrulanmıştır. 2000'li yılların başlarında ise ticari QKD sistemleri piyasaya sürülmüş ve bu durum, kuantum kriptografinin gerçek dünya uygulamalarına daha yakın hale gelmesini sağlamıştır.

Teknolojik atılımlardan biri de kuantum tekrarlayıcıların geliştirilmesi olmuştur. Kuantum tekrarlayıcılar, optik fiberlerde foton kaybı ve bozunmayı engelleyerek uzun mesafeli QKD'yi mümkün kılmıştır (Briegel ve diğerleri, 1998). Bu yenilik, QKD ağlarının laboratuvar ortamlarının ötesine geçerek gelecekteki kuantum iletişim ağlarının temelini oluşturmasını sağlamıştır.

Kuantum kriptografi, günümüzde küresel araştırma ve teknolojik gelişim çabalarının merkezinde yer almaktadır. Çin, Amerika Birleşik Devletleri ve Avrupa Birliği gibi ülkeler, kuantum iletişim altyapısına büyük yatırımlar yapmıştır. Örneğin, Çin, 2016 yılında dünyadaki ilk kuantum iletişim uydusu olan Micius'u uzaya göndermiş ve 1.000 kilometreden fazla mesafelerde uydu tabanlı QKD'nin mümkün olduğunu göstermiştir (Yin ve diğerleri, 2017). Bu tür projeler, kuantum kriptografinin küresel güvenli iletişimdeki potansiyelini vurgulamaktadır.

Kuantum kriptografinin gelişimi, yalnızca kuantum temelli güvenlik çözümleriyle sınırlı kalmamış, aynı zamanda kuantum bilgisayarların klasik kriptografi üzerindeki tehditlerine karşı yeni yaklaşımların geliştirilmesini de tetiklemiştir. Bu bağlamda, ABD Ulusal Standartlar ve Teknoloji Enstitüsü (NIST), 2016 yılında "Kuantum Sonrası Kriptografi Standardizasyon Projesi"ni başlatmıştır. Bu proje, kuantum bilgisayarların etkili bir şekilde çözebileceği mevcut klasik şifreleme algoritmalarına karşı dirençli algoritmaların geliştirilmesini ve standartlaştırılmasını amaçlamaktadır. Proje, dünya çapındaki akademik ve endüstriyel katılımcıların sunduğu birçok algoritmayı değerlendirerek, simetrik anahtarlı şifreleme, dijital imzalar ve anahtar değişim protokollerine odaklanmıştır. 2022 yılında, NIST ilk standartlaşma adaylarını açıklamış ve bu algoritmaların daha fazla analize tabi tutulacağını duyurmuştur. Başarılı algoritmalar, kuantum sonrası çağda hem kamu hem de özel sektör uygulamaları için temel güvenlik bileşenleri olarak hizmet edecektir (Chen ve diğerleri, 2016). NIST'in bu girişimi, kuantum bilgisayarların klasik kriptografiye yönelik potansiyel tehditlerini ele almanın yanı sıra, kuantum temelli çözümler ile klasik sistemler arasındaki boşluğu doldurarak hibrit bir güvenlik modelinin geliştirilmesini desteklemektedir. Bu çaba hem kuantum kriptografi hem de kuantum sonrası kriptografi alanlarındaki küresel araştırmaların önemli bir bileşeni haline gelmiştir.

Kuantum kriptografinin tarihsel yolculuğu, teorik fiziğin pratik mühendislikle birleşerek ortaya çıkardığı dönüştürücü gücün bir kanıtıdır.

KUANTUM BİLGİSAYARLARIN KRİPTOGRAFİYE ETKİSİ

Kuantum bilgisayarlar, klasik kriptografinin temel varsayımlarını sorgulatarak, yaygın olarak kullanılan birçok sistemin savunmasız hale gelmesine neden olmaktadır. Süperpozisyon ve dolanıklık gibi prensiplerden yararlanan kuantum bilgisayarlar, bazı problemleri klasik bilgisayarlardan üstel derecede daha hızlı çözebilmektedir. Bu teknolojik sıçrama, birçok alanda umut vaat ederken, geleneksel kriptografik sistemler için ciddi tehditler oluşturmaktadır ve kuantum dayanıklı çözümlerin geliştirilmesini zorunlu hale getirmektedir. Geleneksel kriptografik sistemler, belirli matematiksel problemlerin hesaplama açısından zorluğuna dayanmaktadır. Bu sistemlerin örnekleri aşağıda verilmiştir:

- **RSA Şifreleme:** RSA'nın güvenliği, büyük tamsayıların asal çarpanlarına ayrılmasının zorluğuna dayanır. Shor'un 1994 yılında önerdiği algoritma, kuantum bilgisayarların bu işlemi verimli bir şekilde gerçekleştirmesini mümkün kılarak RSA şifrelemesini geçersiz kılmaktadır (Shor, 1994).
- **Eliptik Eğri Kriptografisi (ECC):** Güvenli iletişimde yaygın olarak kullanılan ECC, eliptik eğriler üzerindeki ayrık logaritma probleminin zorluğuna dayanır. Shor'un algoritması, bu problemi polinomsal zaman içinde çözerek ECC'yi de tehdit etmektedir (Shor, 1994).
- **Simetrik Anahtar Kriptografisi:** AES gibi simetrik şifreleme algoritmaları göreceli olarak güvenli kalsa da, Grover'ın algoritması, kuantum bilgisayarların kaba kuvvet saldırılarını iki kat daha hızlı gerçekleştirmesini sağlar ve eşdeğer güvenlik için anahtar uzunluğunu iki katına çıkarmayı gerektirir (Grover, 1996).
- Bu açıklar, kuantum saldırılarına dayanıklı kriptografik yöntemlerin gerekliliğini vurgulamaktadır. Kuantum bilgisayarların oluşturduğu tehdit, kuantum sonrası kriptografi (Post-Quantum Cryptography, PQC), olarak da bilinen kuantum dayanıklı kriptografi çalışmalarını hızlandırmıştır. PQC algoritmaları hem klasik hem de kuantum hesaplama saldırılarına karşı güvenli olacak şekilde tasarlanmıştır. En umut verici kuantum dayanıklı algoritma aileleri şunlardır:
- **Kafes Tabanlı Kriptografi**: LWE (Learning With Errors) problemi gibi kafes problemlerinin zorluğuna dayanan bu algoritmalar, güçlü güvenlik garantileri ve verimli uygulamalar sunar (Regev, 2009).

- **Kod Tabanlı Kriptografi:** Rastgele doğrusal kodların çözüm zorluğuna dayanan McEliece şifrelemesi gibi yöntemler, kuantum saldırılarına karşı dayanıklıdır (McEliece, 1978).
- **Çok Değişkenli Denklem Sistemleri:** Sonlu alanlar üzerinde çok değişkenli kuadratik denklemlerden oluşan sistemlerin çözüm zorluğuna dayanan bu algoritmalar, güvenlik vaat etmektedir (Ding ve diğerleri, 2006).
- **Hash Tabanlı İmzalar:** Kriptografik hash fonksiyonlarının güvenliğine dayanan bu imzalar, dijital imzalar için standart hale getirilmiştir (Merkle, 1989).

Kuantum dayanıklı kriptografinin uygulanması, umut verici bir çözüm sunmakla birlikte çeşitli zorluklarla karşılaşmaktadır. Birçok PQC algoritması, klasik yöntemlere kıyasla daha büyük anahtar boyutları ve daha yüksek hesaplama yükü gerektirdiğinden, özellikle kaynak kısıtlı ortamlarda performans sorunlarına yol açabilir. Ayrıca, NIST'in Kuantum Sonrası Kriptografi Projesi gibi küresel standartlaştırma çabaları, güvenli ve verimli algoritmaların belirlenmesi için kritik öneme sahiptir. Bunun yanında, PQC'nin mevcut altyapılara entegrasyonu, uyumluluk ve ölçeklenebilirlik açısından dikkatli bir şekilde ele alınmalıdır. Bu zorluklar, kuantum dayanıklı sistemlere geçiş sürecinin teknik, operasyonel ve standartlaştırma boyutlarında kapsamlı bir değerlendirme gerektirdiğini göstermektedir.

Bu çalışmalara ek olarak, hibrit kriptografik sistemler, klasik ve kuantum dayanıklı algoritmaları birleştirerek kuantum tehditlerine karşı geçiş dönemi için bir çözüm sunar. Bu sistemler, mevcut standartlarla uyumluluğu korurken, kuantum dayanıklılığı da entegre ederek pratik bir yol sağlar (Mosca, 2018).

KUANTUM KRİPTOGRAFİ PROTOKOLLERİ

Kuantum kriptografi protokolleri, güvenli kuantum iletişimin temelini oluşturarak anahtar dağıtımı ve bilgi güvenliğini sağlamak için çeşitli yöntemler sunar. Bu protokoller, kuantum mekaniğinin farklı prensiplerinden yararlanarak güvenliği garanti eder.

BB84 protokolü, 1984 yılında Bennett ve Brassard tarafından önerilmiş olup kuantum kriptografi protokollerinin temelini oluşturur ve en çok incelenen protokol olma özelliğini taşır. Bir "hazırla-ve-ölç" protokolü olarak BB84, anahtar bitlerini fotonların polarizasyon durumlarına kodlar. Alice, rastgele seçilen iki tabandan (dikdörtgen veya çapraz) birine göre bir dizi foton gönderir ve Bob, bu fotonları rastgele seçilmiş tabanlarla ölçer. İletimin ardından Alice ve Bob, açık

bir kanalda kullandıkları tabanları karşılaştırır ve yalnızca eşleşen tabanlardan elde edilen sonuçları tutarak bir ham anahtar oluştururlar. No-cloning teoremi nedeniyle herhangi bir dinleme girişimi hatalar üreteceğinden, protokolün güvenliği garanti altına alınır (Bennett & Brassard, 1984).

Ekert'in 1991 yılında önerdiği E91 protokolü, kuantum dolanıklığına dayalı bir anahtar dağıtım yöntemidir. BB84'ün aksine, E91, bireysel fotonlar yerine Alice ve Bob arasında paylaşılan dolanık foton çiftlerini kullanır. Bu foton çiftleri üzerinde yapılan ölçümler, Bell eşitsizliğini ihlal eden korelasyonlar üretir. Eğer ölçüm sonuçları Bell eşitsizliğini ihlal ediyorsa, bu durum dinleme girişimi olmadığını ve paylaşılan anahtarın güvenli olduğunu garanti eder (Ekert, 1991). E91 protokolü ayrıca, cihazların iç işleyişine güven gerektirmeyen cihazdan bağımsız kuantum anahtar dağıtımı (DI-QKD) için bir temel teşkil eder (Acín ve diğerleri, 2006).

Decoy-state protokolü, kuantum anahtar dağıtımında önemli bir güvenlik açığı olan Foton Sayısı Bölme (PNS) saldırılarını ele alır. Pratik QKD sistemlerinde, mükemmel olmayan tek foton kaynakları bazen birden fazla foton yayar ve bu, dinleyicinin (Eve) bir fotonu kesip diğerlerini bozmadan iletmesine olanak tanır. Decoy-state protokolü, foton darbelerinin yoğunluğunu rastgele değiştirerek bu riski azaltır. Bu yöntem, Alice ve Bob'un tespit edilen fotonların istatistiksel dağılımını analiz ederek PNS saldırılarını tespit etmesini sağlar (Lo ve diğerleri, 2005).

DI-QKD, kuantum kriptografide önemli bir yenilik olarak, cihazların iç işleyişine güvenme gereksinimini ortadan kaldırır. Bu yaklaşım, güvenliği doğrulamak için dolanık durumlar ve Bell testlerini kullanır. Bu sayede cihazlar kusurlu veya tehlikeye atılmış olsa bile protokolün güvenliği korunur (Masanes ve diğerleri, 2011). DI-QKD, uygulama kusurlarının kaçınılmaz olduğu gerçek dünya uygulamaları için özellikle önemlidir.

Klasik ayrık değişkenli QKD protokollerinin aksine, sürekli değişkenli QKD (CV-QKD), bilgiyi koherent ışık durumlarının kuadraturlarında kodlar. CV-QKD, mevcut optik iletişim altyapısıyla, özellikle fiber optik ağlarla uyumluluk sağlar ve kısa mesafelerde daha yüksek anahtar oranları sunar. Ancak, artan gürültü ve kayıplar nedeniyle uzun mesafeli iletişimde zorluklarla karşılaşmaktadır (Weedbrook ve diğerleri, 2012).

Her bir kuantum kriptografi protokolü, güvenlik, verimlilik ve uygulama yapılabilirliği arasında belirli denge ve ödünleşimlerle belirli zorlukları hedef alır. BB84 ve E91 gibi ayrık değişkenli protokoller iyi bilinirken, CV-QKD ve DI-QKD gibi yeni yaklaşımlar kuantum kriptografinin kapsamını yeni uygulamalara

ve ortam koşullarına taşımaktadır. Protokollerin çeşitliliği, kuantum kriptografinin modern güvenli iletişim sistemlerinin çeşitli taleplerine uyarlanmasını sağlamaktadır.

KUANTUM KRİPTOGRAFİNİN AVANTAJLARI VE DEZAVANTAJLARI

Kuantum kriptografi bilgi güvenliği alanında benzersiz avantajlar sağlarken, benimsenmesi önemli pratik ve teknolojik zorluklarla da karşı karşıyadır. Bu bölüm, modern güvenli iletişim sistemleri bağlamında kuantum kriptografinin temel avantajlarını ve sınırlamalarını incelemektedir.

Kuantum Kriptografinin Avantajları

- **Bilgi-Teorik Güvenlik:** Klasik kriptografik sistemlerin aksine, kuantum kriptografi hesaplama zorluğu varsayımlarına dayanmaz; bunun yerine bilgi-teorik güvenlik sağlar. BB84 gibi Kuantum Anahtar Dağıtımı (QKD) protokolleri, güvenliği fiziksel yasalar, özellikle no-cloning teoremi ve kuantum belirsizlik ilkelerine dayandırır. Bu durum, sınırsız hesaplama kaynaklarına sahip bir saldırganın bile sistemi tespit edilmeden aşamayacağını garanti eder.
- **Kuantum Bilgisayarlara Karşı Dayanıklılık:** RSA ve eliptik eğri kriptografisi gibi klasik kriptografik sistemler, asal çarpanlara ayırma ve ayrık logaritma gibi problemleri polinom zamanda çözebilen Shor algoritması nedeniyle kuantum bilgisayarlara karşı savunmasızdır. Buna karşılık, QKD kuantum hesaplama saldırılarına karşı bağışıklık sağlayarak kuantum çağında güçlü bir çözüm sunar.
- **Cihazdan Bağımsızlık:** Cihazdan bağımsız kuantum anahtar dağıtımı (DI-QKD) alanındaki ilerlemeler, kuantum cihazları güvenilir veya saldırıya açık olsa bile güvenlik sağlar. Bell eşitsizliklerinden ve dolanıklık özelliklerinden yararlanan DI-QKD, yan kanal saldırılarına karşı savunmasızlıkları ortadan kaldırır.

Kuantum Kriptografinin Dezavantajları

- **Yüksek Uygulama Maliyetleri:** Kuantum kriptografik sistemler için gerekli olan tek foton kaynakları, dedektörler ve kuantum tekrarlayıcılar gibi donanımlar, klasik sistemlere kıyasla oldukça maliyetlidir. Bu yüksek maliyetler, özellikle kaynak sınırlı ortamlarda kuantum kriptografinin yaygın olarak benimsenmesini kısıtlamaktadır.
- **Mevcut Altyapıyla Entegrasyon:** Kuantum kriptografik sistemler, genellikle klasik iletişim altyapısıyla uyumlu olmayan özel donanım ve protokoller gerektirir. Bu sistemlerin mevcut ağlara entegrasyonu teknik zorluklar oluşturmakta ve kurulum karmaşıklığını artırmaktadır.
- **Ölçeklenebilirlik ve Standartlaştırma:** Kuantum kriptografik ağların küresel iletişimi destekleyecek şekilde ölçeklendirilmesi büyük bir zorluk olmaya devam etmektedir. Ayrıca, kuantum kriptografi için evrensel kabul görmüş standartların eksikliği, yaygın dağıtımı ve sistemlerin birlikte çalışabilirliğini engellemektedir.

SONUÇ

Kuantum kriptografi, klasik kriptografik sistemlerle ilişkili birçok güvenlik açığına çözüm sunarak bilgi güvenliği alanında yenilikçi bir disiplin olarak ortaya çıkmıştır. Bu disiplin, özellikle kuantum bilgisayarların ve gelişmiş siber tehditlerin şekillendirdiği bir çağda, benzersiz bir güvenlik seviyesi sunmaktadır. Bununla birlikte, kuantum kriptografinin karşılaştığı zorluklar da bulunmaktadır. Kuantum donanımının yüksek maliyetleri, mevcut kuantum iletişim sistemlerinin sınırlı menzili ve kuantum teknolojilerinin mevcut altyapıya entegrasyonundaki zorluklar, geniş çaplı benimsenmenin önündeki en büyük engellerdir. Ayrıca, pratik sistemler kusurlara ve yan kanal saldırılarına karşı savunmasızdır. Gerçek dünyadaki uygulamalarda güvenliği sağlamak için donanım ve protokollerde sürekli yenilik yapılması gerekmektedir.

Uzun vadede, kuantum kriptografinin tamamen işlevsel bir kuantum internet ile entegrasyonu, küresel ölçekte güvenli iletişimi yeniden tanımlama potansiyeline sahiptir. Bu vizyon, kuantum dolanıklığı ve kuantum teleportasyon gibi teknolojilerin kullanılmasıyla anlık ve güvenli veri alışverişine olanak tanımaktadır. Böyle bir sistem, kritik altyapıları destekleyebilir, finansal işlemleri güvence altına alabilir ve sağlık, savunma ve yönetim gibi hassas bilgilerin korunmasını sağlayabilir.

Kuantum kriptografinin daha geniş çaplı benimsenmesi, dijital egemenlik ve küresel siber güvenlik açısından da önemli sonuçlar doğuracaktır. Ulusların ve organizasyonların verilerini gelecekteki tehditlere karşı korumasını sağlayarak, kuantum kriptografi, giderek daha bağlantılı ve savunmasız hale gelen dijital dünyada dayanıklılığın temel taşı haline gelmektedir.

Kuantum kriptografi, klasik yöntemlerin ele alamadığı tehditlere çözümler sunarak yeni nesil siber güvenliğin temel taşı olarak öne çıkmaktadır. Pratik uygulamaları çeşitli zorluklarla karşılaşsa da teknolojideki, standardizasyondaki ve iş birliğindeki ilerlemeler, kuantum kriptografinin geniş çaplı benimsenmesi için zemin hazırlamaktadır. Kuantum kriptografinin ortaya çıkan teknolojilerle entegrasyonu ve gelecekteki kuantum internet içindeki rolü, onun dönüştürücü potansiyelini vurgulamaktadır.

Araştırmalar ilerledikçe ve küresel çabalar birleştikçe, kuantum kriptografinin, geleceğin dijital altyapılarının güvenliğinde merkezi bir rol oynaması beklenmektedir. Bu devrim niteliğindeki teknolojiyi benimseyerek, bilgi güvenliğinin sağlam, kuantum tehditlerine karşı dayanıklı olduğu bir geleceğe hazırlık yapılabilir.

KAYNAKÇA

1. Acin, A., Gisin, N., & Masanes, L. (2006). From Bell's theorem to secure quantum key distribution. Physical review letters, 97(12), 120405.

2. Bennett, C. H.; Brassard, G. (1984). "Quantum cryptography: Public key distribution and coin tossing". Proceedings of the International Conference on Computers, Systems & Signal Processing, Bangalore, India. Vol. 1. New York: IEEE. pp. 175–179. arXiv:2003.06557. Reprinted as Bennett, C. H.; Brassard, G. (4 December 2014). "Quantum cryptography: Public key distribution and coin tossing". Theoretical Computer Science. Theoretical Aspects of Quantum Cryptography – celebrating 30 years of BB84. 560 (1): 7–11. arXiv:2003.06557. doi:10.1016/j.tcs.2014.05.025.

3. Briegel, H.-J., Dür, W., Cirac, J. I., & Zoller, P. (1998). Quantum repeaters: The role of imperfect local operations in quantum communication. Physical Review Letters, 81(26), 5932–5935.

4. Chen, L., Chen, L., Jordan, S., Liu, Y. K., Moody, D., Peralta, R., ... & Smith-Tone, D. (2016). Report on post-quantum cryptography (Vol. 12). Gaithersburg, MD, USA: US Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology.

5. Ding, J., Gower, J. E., & Schmidt, D. S. (2006). Multivariate public key cryptosystems (Vol. 25). Springer Science & Business Media.

6. Ekert, A. K. (1991). Quantum cryptography based on Bell's theorem. Physical review letters, 67(6), 661.

7. Grover, L. K. (1996, July). A fast quantum mechanical algorithm for database search. In Proceedings of the twenty-eighth annual ACM symposium on Theory of computing (pp. 212-219).

8. Hwang, W. Y. (2003). Quantum key distribution with high loss: toward global secure communication. Physical review letters, 91(5), 057901.

9. Kimble, H. J. (2008). The quantum internet. Nature, 453(7198), 1023-1030.

10. Lo, H.-K., Ma, X., & Chen, K. (2005). Decoy state quantum key distribution. Physical Review Letters, 94(23), 230504.

11. Lydersen, L., Wiechers, C., Wittmann, C., Elser, D., Skaar, J., & Makarov, V. (2010). Hacking commercial quantum cryptography systems by tailored bright illumination. Nature photonics, 4(10), 686-689.

12. Masanes, L., Pironio, S., & Acín, A. (2011). Secure device-independent quantum key distribution with causally independent measurement devices. Nature communications, 2(1), 238.

13. McEliece, R. J. (1978). A public-key cryptosystem based on algebraic. Coding Thv, 4244, 114-116.

14. Merkle, R. C. (1989, August). A certified digital signature. In Conference on the Theory and Application of Cryptology (pp. 218-238). New York, NY: Springer New York.

15. Mosca, M. (2018). Cybersecurity in an era with quantum computers: Will we be ready?. IEEE Security & Privacy, 16(5), 38-41.

16. Pirandola, S., Andersen, U. L., Banchi, L., Berta, M., Bunandar, D., Colbeck, R., ... & Wallden, P. (2020). Advances in quantum cryptography. Advances in optics and photonics, 12(4), 1012-1236.

17. Regev, O. (2009). On lattices, learning with errors, random linear codes, and cryptography. Journal of the ACM (JACM), 56(6), 1-40.

18. Shor, P.W. (1994). "Algorithms for quantum computation: Discrete logarithms and factoring". Proceedings 35th Annual Symposium on Foundations of Computer Science. pp. 124–134.

19. Weedbrook, C., Pirandola, S., García-Patrón, R., Cerf, N. J., Ralph, T. C., Shapiro, J. H., & Lloyd, S. (2012). Gaussian quantum information. Reviews of Modern Physics, 84(2), 621-669.

20. Yin, J., Cao, Y., Li, Y. H., Liao, S. K., Zhang, L., Ren, J. G., ... & Pan, J. W. (2017). Satellite-based entanglement distribution over 1200 kilometers. Science, 356(6343), 1140-1144.



Mikrobiyal Gübrelerin Çevreye Etkileri

Gözde Hafize Yıldırım [1]

[1] Araş. Gör. Dr., Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Ziraat Fakültesi Tarla Bitkileri Bölümü, Rize/Türkiye
Orcid: 0000-0002-0557-6442

GİRİŞ

Artan dünya nüfusunun beslenme ihtiyaçlarını karşılayabilmek için tarımsal üretimi artırmak kaçınılmaz bir gereklilik haline gelmiştir. Ancak mevcut tarım alanlarının genişletilmesinin sınırlı olması, birim alandan daha yüksek verim alınmasını zorunlu kılmaktadır. Bu doğrultuda, özellikle 20. yüzyılda yoğun şekilde kullanılan kimyasal gübreler, verim artışı sağlasa da toprak yapısını bozarak çevre üzerinde olumsuz etkiler yaratmıştır. Kimyasal gübrelerin aşırı ve bilinçsiz kullanımı, topraktaki mikroorganizmaların azalmasına, toksik maddelerin birikmesine ve biyolojik dengenin bozulmasına neden olmuştur. Bu durum, sürdürülebilir tarımın devamı için çevre dostu gübreleme yöntemlerinin geliştirilmesini gerekli kılmıştır (Kibar 2020).

Mikrobiyal gübreler, tarımsal üretimi artıran, çevresel sürdürülebilirliği destekleyen ve toprak sağlığını iyileştiren organik materyallerdir. Bu gübreler, azot fiksasyonu, fosfat çözünürlüğü ve biyoaktif maddelerin üretimi gibi biyolojik süreçler yoluyla bitki gelişimini teşvik eder. Rizobakteriler ve mikorizal mantarlar gibi toprak mikrobiyotasıyla simbiyotik ilişkiler kuran organizmalar, bitkilerin stres koşullarına direncini artırırken besin alımını kolaylaştırır (Higa, 1994; Gupta, 2012). Kimyasal gübrelerin çevresel zararlarının artmasıyla, mikrobiyal gübreler ekolojik tarım ve sürdürülebilir üretim sistemleri için önemli bir alternatif haline gelmiştir.

Bitki gelişimini teşvik eden biyolojik uygulamalar, sürdürülebilir tarımın temelini oluşturur. Toprak rizosferinde simbiyotik yaşamı güçlendiren biyolojik gübreler, bitki besin elementlerinin daha etkili alınmasını sağlar ve kimyasal gübre kullanımını azaltır (Çakmakçı, 2005). Biyolojik mücadelede kullanılan mikroorganizmalar, bitki köklerini patojenlere karşı korurken aynı zamanda bitki büyümesini teşvik edici metabolitler üretir. Rizobakteriler (PGPR) ve bitki gelişimini teşvik eden mantarlar (PGPF), bitki büyümesi için hayati öneme sahiptir. Bu mikroorganizmalar, kök bölgesinde patojenleri baskılar, içsel etilen miktarını azaltır ve bitki büyüme hormonlarına benzer bileşikler üretir (Whipps, 2001; Antoun and Prevost, 2005; Altunlu 2019).

Bu derlemenin amacı, mikrobiyal gübreler hakkında genel bilgi sunmak, bu gübrelerin tarımda nasıl kullanıldığını açıklamak ve sürdürülebilir tarım uygulamaları açısından taşıdığı önemi vurgulamaktır.

MİKROBİYAL GÜBRELERİN BİTKİLERE SAĞLADIĞI YARARLAR

Mikrobiyal gübreler, topraktaki biyolojik çeşitliliği zenginleştirerek verimliliği artırır. Faydalı mikroorganizmalar arasında yer alan rizobakteriler, azot bağlama, fosfat çözme ve bitkisel hormon üretimiyle toprak verimliliğini yükseltir ve bitkilerin kuraklık gibi stres koşullarına direncini artırır (Şahin ve ark., 2004). Mikorizal mantarlar, bitki kökleriyle simbiyotik ilişkiler kurarak su ve besin maddelerine erişimi kolaylaştırır (Newman ve Reddell, 1987). Bu organizmalar, toprak organik maddelerini dönüştürerek bitkilerin besin alımını optimize eder ve toprağın fiziksel yapısını iyileştirir (Türkmen ve ark., 2008).

Bitkilerin ihtiyaç duyduğu besin maddelerini biyolojik yollarla yarayışlı hale getiren mikroorganizmaların kullanıldığı gübreler, mikrobiyal gübre olarak tanımlanır. Bu gübreler, canlı mikroorganizmaların çoğaltılıp bitkilere uygun bir formda verilmesiyle uygulanır. Günümüzde, çevre dostu üretim tekniklerine olan ilginin artmasıyla mikrobiyal gübre kullanımı da önem kazanmıştır (Kibar 2020).

Trichoderma mantarları, biyolojik mücadelede sıklıkla kullanılan etkili bir ajandır. Bu mantarlar, bitki kök hastalıklarını hiperparazitizm, antibiyosis ve rekabet gibi biyolojik mekanizmalarla baskılar. Trichoderma türlerinin salgıladığı sekonder metabolitler, oksin benzeri etkiler göstererek kök büyümesini teşvik eder ve bitki gelişimini olumlu yönde etkiler. Araştırmalar, T. harzianum uygulamalarının mısır yetiştiriciliğinde verimi artırdığını ve bitkilerin stres koşullarına dayanıklılığını artırdığını göstermiştir (Harman, 2000; Vinale et al., 2008; Altunlu 2019).

Mikoriza mantarları, bitkilerle simbiyotik bir yaşam formu geliştirerek mineral besin elementlerini bitkilere taşır. Arbüsküler mikorizalar, özellikle fosfor ve çinko gibi minerallerin alımını artırarak bitkilerin büyüme ve dayanıklılık kapasitesini yükseltir (Smith and Read, 2008). Mikorizaların su alınımını artırması ve biyotik/abiyotik stres koşullarına karşı direnç sağlaması, bitki sağlığına olan katkılarını daha da değerli kılmaktadır (Ortaş, 2000; Altunlu 2019).

Rizobakteriler, azot bağlama ve fosfat mobilizasyonuyla bitki büyümesini teşvik ederken, mikorizal mantarlar su ve besin elementlerinin bitki tarafından daha etkin kullanımını sağlar (Olgaç ve ark., 2022).

PGPR'ler, kök bölgesinde yaşayan ve bitki büyümesini destekleyen bakterilerdir. Azot bağlama, fosfor çözme ve bitki hormonları üretme gibi mekanizmalarla bitkilerin gelişimine katkı sağlarlar. Bu bakteriler, ayrıca toprak patojenlerini baskılayarak bitkilerin hastalıklara karşı direncini artırır (Jeon et al., 2003).

Bacillus türleri gibi bakterilerin toprakta bağlı fosforu çözerek bitki büyümesini ve verimini artırdığı bilimsel olarak kanıtlanmıştır (Güneş vd., 2013).

MİKROBİYAL GÜBRELERİN ÇEVRE İLE UYUMU

Mikrobiyal gübreler, tarımsal üretimde çevre dostu bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. Doğal mikroorganizmalar ile zenginleştirilmiş bu gübreler, çevre kirliliği ve küresel ısınma gibi sorunlara karşı etkili bir çözüm sunmaktadır. Mikorizal mantarlar gibi mikroorganizmalar, toprak ekosistemini iyileştirirken, bitkilerin su ve besin alımını artırmakta, çevre kirliliği riskini azaltmakta ve toprak sağlığını desteklemektedir (Sandal ve ark., 2014). Çevresel sürdürülebilirlik açısından bu gübrelerin kullanımı, kimyasal gübrelerin doğurduğu olumsuz etkileri dengeleyerek, tarım arazilerinin uzun vadeli verimliliğini korumaktadır.

Mikrobiyal gübreler, bitki gelişimini destekleyen, doğal dengeyi koruyan ve çevresel etkileri minimuma indiren önemli bir tarımsal girdi olarak karşımıza çıkmaktadır. 04.06.2010 tarihli Resmi Gazetede yayımlanmış olan Tarımda Kullanılan Organik, Organomineral Gübreler ve Toprak Düzenleyiciler ile Mikrobiyal, Enzim İçerikli ve Diğer Ürünlerin Üretimi, İthalatı ve Piyasaya Arzına Dair Yönetmelik, mikrobiyal gübreleri "bitki için gerekli olan besin maddelerini biyolojik yollarla sağlayan canlı mikroorganizmaların ticari formülasyonları" olarak tanımlamaktadır (Anonim, 2023). Bu gübreler, bitkilerle simbiyotik ilişkiler kurarak topraktaki makro ve mikro elementleri bitkiye taşır ve toprağın mikrobiyal aktivitesini artırarak ekosisteme katkı sağlar. Kimyasal gübrelerin yoğun kullanımına kıyasla mikrobiyal gübreler, doğal dengeyi koruyucu özellikleriyle ön plana çıkar. Bu gübreler, çevre kirliliğine neden olmadan tarımsal üretimde etkin bir şekilde kullanılabilir. Dünya Sağlık Örgütü'nün (WHO) Mikroorganizma Risk Gruplandırması Listesinde yer alan ve insana zarar vermeyen mikroorganizmalar içerdiği için güvenli bir tarım uygulamasıdır (Avan ve Kotan, 2021; Baran ve Köse 2023).

SONUÇ

Kimyasal gübrelerin aşırı ve bilinçsiz kullanımına bağlı olarak ortaya çıkan toprak ve çevre sorunları, mikrobiyal gübrelerin daha yaygın bir şekilde kullanılmasını zorunlu kılmaktadır. Mikrobiyal gübreler, çevresel sürdürülebilirliği desteklerken aynı zamanda bitki gelişimini artırarak tarımsal verimliliği ve ürün kalitesini yükseltmektedir. Gelecekte, tarımda bu tür yenilikçi ve çevre dostu uygulamaların benimsenmesi, insan sağlığını koruma ve tarım alanlarının verimliliğini artırma açısından kritik öneme sahip olacaktır. Mikrobiyal gübrelerin geniş kullanım potansiyeli, tarımın geleceği için umut vaat eden bir çözüm sunmaktadır.

KAYNAKLAR

Altunlu, H., Demiral, O., Dursun, O., Sönmez, M., & Ergün, K. (2019). Mikrobiyal gübre uygulamasının tatlı mısır (Zea mays L. var. saccharata) yetiştiriciliğinde bitki gelişimi ve verim üzerine etkileri. *Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, *50*(1), 32-39.

Anonim, 2023. Tarımda kullanılan organik, organomineral, özel, mikrobiyal ve enzim içerikli organik gübreler ile toprak düzenleyicilerin üretimi, ithalatı, ihracatı, piyasaya arzı ve denetimine dair yönetmelik. Tarım ve Köyişleri Bakanlığı, Resmi Gazete No: 27601

Antoun, H., Prevost, D., 2005. Ecology of plant growth promoting rhizobacteria. In: PGPR: Biocontrol and Biofertilization, Siddiqui, Z.A. (Ed.), Dordrecht, Germany: Springer, pp. 1-38.

Avan M, Kotan R. 2021. Fungusların mikrobiyal gübre veya biyopestisit olarak tarımda kullanılması. Uluslararası Doğu Anadolu Fen Mühendislik ve Tasarım Dergisi, 3(1): 167-191

Baran, M., & Köse, Ö. D. E. (2023). Yayım Mikrobiyal Gübreler ve Kullanım Alanları. *International Congresses of Turkish Science and Technology Publishing*, 155-160.

Çakmakçı, R., 2005. Bitki Gelişimini Teşvik Eden Rizobakterilerin Tarımda Kullanımı. Atatürk Üniv. Zir.Fak.Derg., (1), 97-107.

Erzurumlu, G. S., & Kara, E. E. (2014). Mikoriza konusunda Türkiye'de yapılan çalışmalar. *Türk Bilimsel Derlemeler Dergisi*, (2), 55-65.

Gupta, V. V. (2012). Beneficial microorganisms for sustainable agriculture. Microbiology Australia, 33(3), 113-115.

Güneş, A., Turan, M., Güllüce, M., Şahin, F., Karaman, M.R., 2013. Farklı bakteri uygulamalarının kaya fosfatının çözünürlüğü üzerine etkisi. Toprak Su Dergisi, 2(1).

Harman, G.E., 2000. Myths and dogmas of biocontrol: Changes in perceptions derived from research on T. harzianum T-22. Plant Diseases, 84: 377-393.

Higa, T. (1994). Effective Microorganisms: A new dimension for nature farming. In *Proceedings of the Second International Conference on Kyusei Nature Farming. US Department of Agriculture, Washington, DC, USA* (pp. 20-22).

Jeon, J.S., Lee, S.S., Kim, H.Y., Ahn T.S., Song, H.G., 2003. Plant growth promotion in soil by some inoculated microorganisms. J. Microbial., 41: 271-276

Kibar, B. (2020). Mikrobiyal gübre uygulamasının marul ve beyaz baş lahanada çimlenme ve fide gelişimi üzerine etkileri. *Uluslararası Tarım ve Yaban Hayatı Bilimleri Dergisi*, *6*(3), 389-398.

Newman, E. I., P. Reddell. (1987). The distribution of mycorrhizas among families of vascular plants. New Phytologist 106,4: 745-751.

Olgaç, Y., Kasım, R., Kasım, M.U. (2022). Süs Bitkilerinde Arbüskülar Mikoriza Kullanımı. Bursa Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi. 36(2): 479-497

Ortaş, İ., 2000. Mikorizanın Çevre Bilimlerinde Kullanımı ve Önemi. GAP Çevre Kongresi, 16- 18 Ekim 2000, Şanlıurfa, s: 255-264.

Smith, S., Read, D.J., 2008. Mycorrhizal Symbiosis. Academic Press, San Diego, CA.

Şahin, F., Çakmakçı, R., Kantar, F. (2004). Sugar beet and barley yields in relation to inoculation with N2-fixing and phosphate solubilizing bacteria. Plant Soil 265, 123-129.

Turkmen, O., Sensoy, S., Demir, S., Erdinc, C. (2008). Effects of two different AMF species on growth and nutrient content of pepper seedlings grown under moderate salt stres. African Journal of Biotechnology Vol. 7 (4), pp. 392-396

Vinale F., Sivasithamparam, K., Ghisalberti, E.L., Marra, R., Barbetti, M.J., Li, H., Woo, S.L., Lorito, M., 2008. A novel role for Trichoderma secondary metabolites in the interactions with plants. Physiol Mol Plant Pathol, 72: 80-86.

Whipps, J. M., 2001. Microbial interactions and biocontrol in the rhizosphere. Journal of Experimental Botany, 52: 487-411.



Organik Gübre Hazırlama Süreçleri

Gözde Hafize Yıldırım [1]

[1] Araş. Gör. Dr., Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Ziraat Fakültesi Tarla Bitkileri Bölümü, Rize/Türkiye
Orcid: 0000-0002-0557-6442

GİRİŞ

Organik gübreler, toprak verimliliğini artıran, çevresel sürdürülebilirliği destekleyen ve tarımsal üretimde önemli rol oynayan doğal kaynaklardır. Kimyasal gübrelerin uzun süreli kullanımı, toprak sağlığı ve çevre üzerinde olumsuz etkilere yol açarken, organik gübreler bu sorunlara etkili bir alternatif sunar. Toprağın fiziksel, kimyasal ve biyolojik özelliklerini iyileştiren organik gübreler, mikroorganizma çeşitliliğini destekler, su tutma kapasitesini artırır ve tarımsal verimliliği teşvik eder (Aygün ve Acar, 2004).

Toprakta azot, fosfor ve potasyum gibi temel besin elementleri, bitkisel üretim sırasında sürekli olarak tükenmektedir. Bu azalan besin maddelerinin, mineral ya da organik gübrelerle yerine konulmaması durumunda, toprak verimliliği azalır ve buna bağlı olarak ürün kayıpları ortaya çıkar. Organik gübreler, bu kayıpların önlenmesi ve toprak sağlığının korunması açısından kritik bir rol oynamaktadır. Türkiye'de konvansiyonel tarım uygulamalarında yılda yaklaşık 6 milyon ton kimyasal gübre ve 39 bin ton sentetik tarım ilacı kullanılmaktadır. Ancak, bu kimyasalların kontrolsüz ve bilinçsiz kullanımı, doğal dengeyi bozarak besin zinciri yoluyla insan sağlığı da dahil olmak üzere tüm canlılar üzerinde olumsuz etkiler yaratmaktadır (Yetgin 2010).

Organik tarım, doğal dengenin korunmasını, kimyasal girdilerin minimum düzeye indirilmesini ve çevreye zarar vermeyen yöntemlerin kullanılmasını hedefler. Bu yaklaşım, insan sağlığına zarar verebilecek gübre, ilaç ve hormonlar yerine doğal materyallerin kullanımını esas alır. Ayrıca, toprağın yapısının korunmasını, su tutma kapasitesinin artırılmasını ve erozyonun önlenmesini de sağlar. Başlangıçta düşük verimle sonuçlansa da alınan önlemlerle organik tarımda zamanla verimlilik artışı sağlanmıştır (Demir ve ark., 2003). Bu bağlamda, organik gübreler organik tarımın vazgeçilmez unsurlarından biridir. Kimyasal gübrelerin aksine, organik gübreler toprağa doğal maddeler sağlar, toprağın fiziksel ve kimyasal özelliklerini iyileştirir. Ayrıca organik gübreler, toprağın organik madde içeriğini artırarak uzun vadede toprak verimliliğini korur ve artırır. Toprağın su tutma kapasitesini artırması ve bitkisel üretim için gerekli olan besin elementlerini doğal yollarla temin etmesi, organik gübrelerin en önemli avantajları arasında yer alır. Böylelikle, organik tarımın sürdürülebilirliği için organik gübreler hem çevreyi koruyan hem de ekonomik bir çözüm sunan değerli bir kaynaktır. Bu derlemenin amacı, organik gübrenin çevreye olan faydalarından bahsederek genel hazırlanma süreci ile ilgili bilgi sunmaktır.

ORGANİK GÜBRE İÇİN GEREKLİ MALZEMELERİN SEÇİMİ

Organik gübreler, farklı bitki ve hayvan kaynaklı materyallerden üretilir. Ahır gübresi, solucan gübresi, leonardit ve biyogübreler gibi türler, azot (N), fosfor (P) ve potasyum (K) gibi temel besin maddelerini doğal bir şekilde sağlayarak toprak yapısını iyileştirir. Ayrıca, kimyasal gübrelere çevresel bir alternatif sunar (Brohi ve ark., 1995). Leonardit uygulamaları, toprağın agregat stabilitesini artırarak erozyona karşı direncini güçlendirir (Sanlı ve ark., 2013).

Alg gübrelerinin, organik madde ve mineral içeriği yüksek olduğu için kimyasal gübrelere göre daha üstün özellikler taşıdığı belirtilmiştir. Ayrıca nem tutma kapasitelerinin yüksek olması, alg gübrelerini tarım için daha cazip hale getirmektedir (Wallen Kemp, 1955). Domates, biber ve patlıcan gibi sebzelerde alg gübrelerinin çimlenme ve büyümeyi olumlu etkilediği birçok çalışma ile kanıtlanmıştır (Demir ve ark., 2006). Örneğin, Sargassum wightii'den elde edilen sıvı ekstraktın buğday (*Triticum aestivum*) üzerinde çimlenme, büyüme ve verimi artırdığı rapor edilmiştir (Kumar ve Sahoo, 2011). Alglerin ekonomik olarak kullanımı oldukça geniş bir yelpazeye sahiptir. Dünya genelinde toplanan ve kültürü yapılan alglerin %50'si gıda sanayisinde, %40'ı ilaç ve kozmetik sektöründe, %10'u ise diğer alanlarda kullanılmaktadır (Güner ve Aysel, 1999). Bununla birlikte, alglerin bilinen en eski kullanım alanı gübredir. Özellikle uzak doğu ülkelerinde algler, kompost veya katı organik gübre olarak uzun yıllardır kullanılmaktadır. Son yıllarda ise alglerden elde edilen sıvı ekstraktların tarımsal üretimde daha yaygın bir şekilde kullanıldığı gözlemlenmiştir. Yaprak gübresi olarak kullanılan alg ekstraktlarının çimlenmeyi ve bitki büyümesini desteklediği tespit edilmiştir. Bunun nedeni, bu ekstraktların bitki büyüme hormonları (Auxin ve Cytokinin), iz elementler (Fe, Cu, Zn, Co, Mo, Mn ve Ni) ve vitaminler bakımından zengin olmasıdır (Challen ve Hemingway, 1965; Akyurt ve ark., 2011).

Tavuk gübresi, organik bir gübre olmasının yanı sıra bitkiler için yüksek miktarda azot ve diğer besin maddeleri sağlayan zengin bir kaynak olarak dikkat çeker. Aynı zamanda, toprağın fiziksel özelliklerini iyileştirme kapasitesine sahip olması ve hayvan yemi katkı maddesi olarak da kullanılabilmesi, bu materyalin tarım ve hayvancılık sektöründeki önemini artırmaktadır. Tavuk yetiştiriciliğinin giderek yaygınlaşmasıyla birlikte, bu gübrenin değerlendirilmesi hem tarımsal üretim hem de çevresel sorunların çözümü açısından kritik bir hale gelmiştir (İnal ve ark., 1996).

Modern tarım sistemleri, toprağın yapısının iyileştirilmesi ve verimliliğin korunması amacıyla organik gübrelerin kimyasal gübrelerle birlikte kullanımını teşvik etmektedir. Bu sistemler, sürdürülebilir toprak yönetimine katkı sağlamakta ve önemli aşamalar kaydetmektedir. Bu bağlamda, toprağın organik madde ve besin elementi yönünden zenginleştirilmesine katkı sağlayan uygulamaların başında vermikompost gelmektedir (Huang ve ark., 2013; Emperor ve Kumar, 2015). Toprağın canlılığını sağlayan temel unsur, toprak mikroorganizmalarının

faaliyetleridir. Bu mikroorganizmalar, organik maddeleri ayrıştırarak beslenmekte ve ayrışma sonucunda bitkiler için mineral bakımından zengin bir besin kaynağı oluşmaktadır. Organik atıkların toprağa karıştırılmadan önce fermantasyon (kompostlama) gibi işlemlerden geçirilmesi, zararlı mikroorganizmaların yok edilmesi ve yararlı bakterilerin popülasyonunun artırılması açısından kritik bir adımdır (Pamir, 1985; Ceritoğlu ve ark., 2019).

Solucan gübresi, tatlı patates gibi ürünlerde nişasta içeriğini artırırken, tavuk ve keçi gübreleri domates bitkisinde en yüksek kuru ağırlık değerlerini sağlamaktadır (Erdal ve ark., 2018; Kmeťová ve ark., 2013).

DOĞAL PARÇALANMA SÜRECİ

Organik gübreler, doğal fermentasyon ve ayrışma süreçleriyle hazırlanır. Bu süreçler, organik maddelerin biyolojik aktivitelerle parçalanmasını ve besin maddelerinin bitkiler için daha kolay erişilebilir hale gelmesini sağlar. Tavuk ve koyun gübreleri, adaçayı gibi bitkilerin uçucu yağ verimini artırarak toprak toksisitesini azaltır (Kocabaş ve ark., 2007). Solucan gübresi, patates ve salata bitkilerinde yaprak büyüklüğünü ve nişasta içeriğini artırırken (Karim ve ark., 2016), tavuk gübresi, patates üretiminde en yüksek yumru verimini sağlamaktadır (Ahmed ve ark., 2019). Organik gübre üretiminde olgunlaşma aşaması, gübrenin tarımsal kullanım için hazır hale gelmesini sağlayan son derece önemli bir süreçtir. Bu aşamada, fermantasyon ve doğal parçalanma ile elde edilen organik materyaller, bitkilerin ve toprağın ihtiyaç duyduğu besin maddelerini içerecek şekilde stabilize edilir. Olgunlaşma sürecinin dikkatle yönetilmesi, gübrenin kalitesini doğrudan etkiler.

SONUÇ

Organik gübreler, çevresel sürdürülebilirliği destekleyen, toprak sağlığını iyileştiren ve tarımsal verimliliği artıran en önemli doğal kaynaklardan biridir. Modern tarımın karşı karşıya olduğu çevresel sorunlara etkili bir çözüm sunarak, toprağın kimyasal, fiziksel ve biyolojik özelliklerini geliştirir. Doğal parçalanma ve fermantasyon gibi süreçlerle elde edilen organik gübreler, toprağın organik madde içeriğini artırırken, aynı zamanda mikroorganizma faaliyetlerini destekleyerek toprak ekosistemini canlı tutar. Doğal gübreleme süreçlerinin tarım uygulamalarına entegrasyonu çevresel sürdürülebilirliği destekleyen bir basamaktır. Organik gübrelerin yaygınlaştırılması, toprağın gelecekteki nesiller için verimli ve sağlıklı kalmasını sağlamak adına atılan önemli bir adımdır.

KAYNAKLAR

Ahmed, F., Mondal, M.M.A. and Akter, M.B., 2019. Organic Fertilizers Effect on Potato (*Solanum tuberosum* L.) Tuber Production in Sandy Loam Soil, İnternational Journal of Plant and Soil Science, 29(3): 1-11, Article no. IJPPS. 50614, ISSN: 2320-7035.

Akyurt, İ., Şahin, Y., & Koç, H. (2011). Deniz marulunun (Ulva sp.) sıvı organik gübre olarak değerlendirilmesi. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, *2*(2), 55-62.

Aygün, Y., & Acar, M. (2004).Organik gübreler ve önemi. *Hasat Dergisi*, *228*, 68-72.

Brohi, A., Aydeniz, A., Karaman, M.N., 1995. Toprak Verimliliği. Gaziosmanpaşa Üniv. Ziraat Fak. Yayınları 5. Kitaplar Serisi 5. Tokat.

Ceritoğlu, M., Şahin, S., & Erman, M. (2019). Vermikompost üretim tekniği ve üretimde kullanılan materyaller. *Türkiye Tarımsal Araştırmalar Dergisi*, *6*(2), 230-236.

Challen and Hemingway, 1965 Challen, S.B., Hemingway, J.C., 1965. Growth of higher plants in response to feeding with seaweed extracts. Proc. 5th Ind. Seaweed Symp.

Demir, N., Dural, B., & Yıldırım, K. (2006). Effect of seaweed suspensions on seed germination of tomato, pepper and aubergine.

Demir, H., Topuz, A., Gölükcü, M., Polat, E., Özdemir, F., & Şahin, H. (2003). Ekolojik üretimde farklı organik gübre uygulamalarının domatesin mineral madde içeriği üzerine etkisi. *Akdeniz University Journal of the Faculty of Agriculture*, *16*(1), 19-25.

Emperor, G.N., Kumar, K., 2015. Microbial population and activity on vermicompost of "Eudrilus eugeniae" and "Eisenia fetida" in different concentrations of tea waste with cow dung and kitchen waste mixture. International Journal of Current Microbiology and AppliedSciences, 4(10): 496-507.

Erdal, İ., Küçükyumuk, Z., Şimşek, K., Basır, M., Baysal, G.D., 2018. Farklı Hayvan Gübrelerinin Domatesin Gelişimi Ve Mineral Beslenmesine Etkisi. SDÜ Ziraat Fakültesi Dergisi, 295-302.

Gaurav Kumar, Dinabandhu Sahooo (2011), Effect of seaweed liquid extract on growth and yield of Triticum aestivum var. Pusa Gold, Journal of Applied Phycology Volume 23, Number 2, 251-255, DOI: 10.1007/s10811-011-9660-9

Güner, H., ve V. Aysel. 1999. The systematic of cryptogams, (in Turkish) Ege Üniversitesi Fen Fakültesi Kitaplar Serisi No: 108, 249s.

Huang, K., Li, F., Wei, Y., Chen, X. and Fu, X., 2013. Changes of bacterial and fungal community compositions during vermicomposting of vegetable wastes by "Eisenia foetida". Bioresource Technology, 150: 235-241.

İnal, A., Sözüdoğru, S., & Erden, İ. (1996). Tavuk gübresinin içeriği ve gübre değeri. *Journal of Agricultural Sciences*, *2*(03), 45-50.

Karim, K.H., Maruf, M.T., Mahmud F.M., 2016. Effect of Different Poultry and Cattle Manure Rates on Yield and Yield Components of Potato (*Solanum tuberosum* L.), cv. Sante, Egypt. J. Exp. Biol. (Bot), 12(2): 155-162.

Kmeťová, M., Kováčık, P., Renčo, M., 2013. The effect of different doses application of dry granulated vermicompost on yield parameters of maize and potatoes. Nitra, Slovaca Universitas Agriculturae Nitriae,, s. 8-14.

Kocabaş, I., Sönmez, İ., Kalkan, H., Kaplan, H., 2007. Farklı Organik Gübrelerin Adaçayı (*Salvia Fructicosa* Mill.)'nın Uçucu Yağ Oranı ve Bitki Besin Maddeleri İçeriğine Etkileri. Akdeniz Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, 20 (1): 105-110.

Pamir, M.H., 1985. Fermantasyon Mikrobiyolojisi. Ankara Üniversitesi Yayınları, Genel Yayın No: 936, Teknik Yayın No: 267, Ankara

Sanli, A., Karadogan, T., Tonguc, M., 2013. Effects of leonardite applications on yield and some quality parameters of potatoes (*Solanum tuberosum* L.). *Turkish Journal of Field Crops*, *18*(1), 20-26.

Wallen Kemp, 1955 J.O. Wallen Kemp, Treasure from the sea, Organic Gard. F.2 (1955) (3), pp. 52-53

Yetgin, M. A. (2010). Organik gübreler ve önemi. *Samsun Tarım İl Müdürlüğü Yayınları*.

BÖLÜM 41

Elektrikli Araç Teknolojisi ve İçten Yanmalı Motorlu Araçların Elektrikli Araçlara Dönüşümü

Kadir Olcay [1] ***& Samet Giray Tunca*** [2] ***& Mustafa Arif Özgür*** [3]

[1] Öğr.Gör.Dr., Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Dumlupınar Meslek Yüksekokulu Elektrik ve Enerji Bölümü, ORCID: 0000-0001-7918-6482
[2] Öğr.Gör.Dr., Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Dumlupınar Meslek Yüksekokulu Elektrik ve Enerji Bölümü, ORCID: 0000-0002-7632-8745
[3] Prof.Dr., Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, ORCID: 0000-0001-5877-4293

Elektrik enerjisi yaşadığımız zamanların en önemli ihtiyaçlarından biri haline gelmiştir. Günlük hayatta ve sanayi tesislerinde en önemli hammaddelerden biri olarak gösterilebilir. Günümüzde elektrik enerjisi üretimi için fosil yakıtlar ve yenilebilir enerji kaynakları kullanılmaktadır. Ülkemizde ve dünyada fosil yakıtların sınırlı kaynaklar olması nedeniyle enerji üretiminde yenilebilir enerji kaynaklarından elektrik üretimine büyük teşvikler verilmekte ve yatırımlar yapılmaktadır. Bunun yanı sıra fosil kaynakların kullanıldığı diğer alanlarda da farklı yakıtlara geçilmesi arayışı olmaktadır. Bunun bir nedeni fosil yakıtların sınırlı kaynaklar olması ve kullanım oranı ile yeni kaynakların bulunması durumları tükenme zamanını değiştirse de yakın gelecekte tükenecek olmasıdır. Diğer bir nedeni ise fosil yakıtların kullanımı sera gazı salınımına neden olmaktadır. Bu durum ise iklim değişikliklerinin temel nedenidir. Elektrikli araçların kullanımının temel motivasyonu ise bu nedenler olarak gösterilebilir.

1. Elektrikli Araçların Teknolojisi

Elektrikli araçların (EA) gelişimi, 19. yüzyılın başlarına kadar uzanan zengin bir tarihe sahiptir. İlk elektrikli araç modeli, 1835 yılında Hollanda'da Profesör Stratingh tarafından geliştirilmiştir. (Ünlü N., 2003) (Kerem A, 2014). Bunu, 1834 yılında Amerikalı mucit Thomas Davenport'un küçük elektrikli bir aracı geliştirmesi izlemiştir. Ancak 1837 yılında Robert Davidson, ilk elektrikle çalışan araçlardan birini İskoçya'da tasarlamış ve bunu 1842 yılında daha güçlü bir versiyon olan elektrikli lokomotif ile genişletmiştir. Davidson'un lokomotifi 6.4 km/h hızına ulaşabilmiştir (Chan, 2013). 1859 yılında Gaston Planté tarafından kurşun-asit bataryaların geliştirilmesi, elektrikli araçlar için önemli bir kilometre taşı olmuştur. Bu bataryalar, enerji depolama kapasitesinin artırılmasıyla EA teknolojisinin ilerlemesine olanak sağlamıştır. 1881 yılında Fransız mucit Gustave Trouvé, üç tekerlekli elektrikli bir araç üreterek ilk gerçekçi elektrikli ulaşım aracı örneklerinden birini sunmuştur.

1882'de Siemens tarafından üretilen Elektromote, dünyanın ilk elektrikli troleybüsü olarak tarihe geçmiştir. Berlin'de tanıtılan bu araç, 2.2 kW'lık motorlarıyla 550 V DC enerjiyle çalışmakta ve ortalama 12 km/h hız yapmaktaydı (Singh, 2013). Elektromote, şehir içi toplu taşıma için elektrik enerjisinin kullanılabileceğini göstermiştir.

Bununla birlikte, içten yanmalı motorlu (İYM) araçlar da aynı dönemde büyük gelişmeler yaşamıştır. 1886 yılında Karl Benz tarafından geliştirilen ve satışa sunulan Motorwagen, İYM teknolojisini araç piyasasına kazandırmıştır. Motorwagen, 0.55 kW'lık bir motorla maksimum 16 km/h hızına ulaşabilmekteydi. Bu gelişme, İYM teknolojisinin hızla yaygınlaşmasına yol açmıştır.

Elektrikli araçların şehir içi kullanımındaki önemi, 1890'larda daha belirgin hale gelmiştir. 1895 yılında Amerikalı mucitler Morris ve Salomon, iki koltuklu Electrobat isimli elektrikli aracı tasarlamışlardır. Bu araçlar, özellikle şehir içi ulaşım ve ticari kullanım için ideal görülmüştür. 1897 yılında İngiltere'de "Londra Elektrikli Taksi Şirketi" tarafından elektrikli taksiler kullanıma sunulmuş, ardından 1901'de New York'ta "New York Taxi" şirketi elektrikli taksilerle hizmet vermeye başlamıştır (Larminie ve Lowry, 2003).

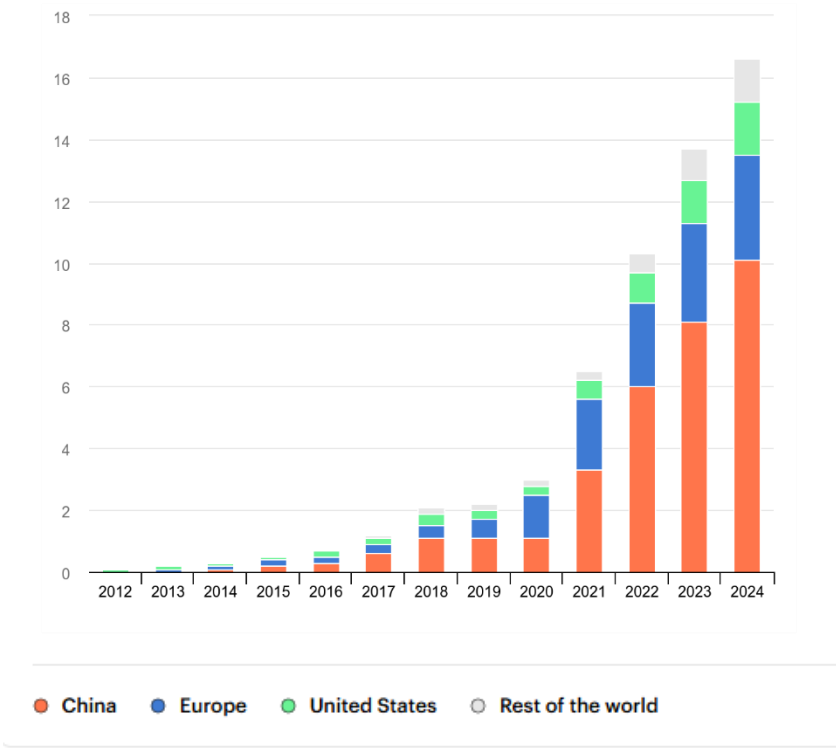
Bu dönemde elektrikli araçlar sessiz, temiz ve kolay kullanımları nedeniyle şehir içinde büyük talep görmüştür. Ancak İYM teknolojisindeki hızlı gelişmeler, petrol kaynaklarının yaygınlaşması ve içten yanmalı araçların daha uzun menzil sunması, elektrikli araçların pazar payını sınırlamıştır.

Bu tarihten itibaren elektrikli araçlar süreç içerisinde zaman zaman yeniden gündeme gelse de içten yanmalı motorlu araçlar özellikle menzil olarak çok daha yüksek seviyede olması ve genellikle hızlı ve ucuz şekilde yakıt sağlanması nedeniyle popülerliğini devam ettirmiştir. Elektrikli araçların gündeme gelmesi CO_2 emisyonunu azaltmak ve fosil yakıtlara otomotiv sektöründeki bağımlılığı azaltmak nedenleri özellikle teşvik edici olmaktadır. Günümüzde de aynı nedenlerden ötürü bu alandaki çalışmalar hızla devam etmekte ve elektrikli araçlar popülerliğini arttırmaktadır.

Günümüzde küresel pazarda elektrikli araçların hızlı bir şekilde yaygınlaştığı görülmektedir. Uluslararası Enerji Ajansının 2024 Global EV Outlook raporuna göre; 2023 yılında dünya genelinde yaklaşık 14 milyon elektrikli otomobil tescil edilerek toplamda 40 milyon adede ulaşılmıştır (IEA, Global EV Outlook,2024). Bu sonuç, GEVO-2023 raporunda öngörülen satış hedefleriyle örtüşmektedir. Elektrikli araç satışları, bir önceki yıla göre 3,5 milyonluk bir artış göstererek %35 oranında bir büyüme kaydetmiştir. Bu artış, 2018 yılına kıyasla sadece beş yıl içinde altı kattan fazla bir artışı ifade etmektedir.

Her hafta 250.000'den fazla elektrikli araç kaydı yapılmış olup, bu rakam 2013 yılındaki yıllık kayıt toplamını geride bırakmıştır. 2023 yılında satılan araçların yaklaşık %18'i elektrikli araçlardan oluşurken, bu oran 2022'de %14 ve 2018'de yalnızca %2 idi. Bu istatistikler, elektrikli araç pazarının gelişmeye devam ettiğini ve büyümenin güçlü bir şekilde sürdüğünü göstermektedir.

Batarya destekli elektrikli otomobiller, 2023 yılı itibarıyla mevcut elektrikli araçların %70'ini oluşturmuş ve sektördeki üstünlüğünü kanıtlamıştır. Bu raporda farklı bölgelerdeki 2012-2024 yılları arasında elektrikli araç satışı aşağıdaki Şekil 1 ile gösterilmiştir.



Şekil 1. 2012-2024 Yılları arasında elektrikli araç satışları (IEA, Global EV Outlook, 2024)

Ülkemizdeki EA sayıları da küresel pazarda olduğu gibi artış göstermektedir. Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) tarafından yayınlanan kasım ayı sonu verilerine göre trafiğe kayıtlı otomobillerin yakıt cinsine göre dağılımı Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1. Trafiğe kayıtlı otomobillerin toplamı ve hibrit ile elektrikli otomobillerin sayısı, 2011-2024 (TÜİK)

Yıl	Toplam	Hibrit	Elektrik
2011	8 113 111	23	24
2012	8 648 875	53	175
2013	9 283 923	83	353
2014	9 857 915	113	412
2015	10 589 337	324	565
2016	11 317 998	517	643
2017	12 035 978	925	760
2018	12 398 190	4 415	952
2019	12 503 049	13 877	1 176
2020	13 099 041	33 690	2 797
2021	13 706 065	86 682	6 267
2022	14 269 352	134 662	14 552
2023	15 221 134	222 328	80 043
2024	16 122 636	365 480	165 898

Bu tablodaki veriler son olarak 2024 kasım ayına aittir. Hibrit olarak belirtilen araçlar benzin-elektrik ve dizel-elektrik araçları kapsamaktadır. Yakıt türü bilinmeyen araçlar, ruhsat işlemleri sırasında yakıt türü alanının doldurulmadığı, eksik bırakıldığı ya da yanlış veri girişi yapıldığı durumları ifade etmektedir.

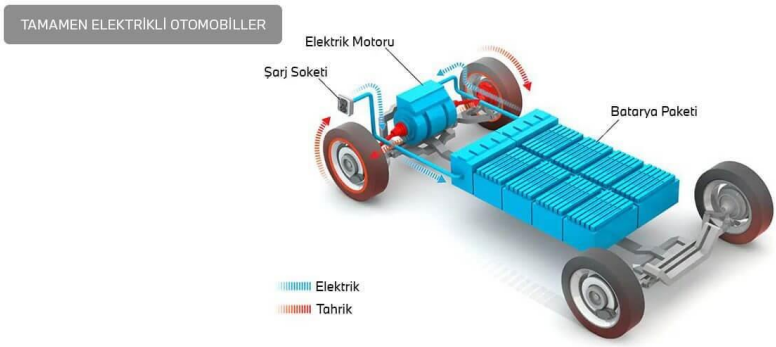
2. Elektrikli Araç Çeşitleri

Elektrikli araçlar (EA), enerji kaynağı ve güç aktarma sistemlerine bağlı olarak farklı kategorilere ayrılmaktadır. Bu araç türleri, teknolojik yapıları, enerji kullanım şekilleri ve çevresel etkileri açısından birbirinden ayrışmaktadır. Elektrikli araç çeşitleri genel olarak şu şekilde sınıflandırılabilir:

- Tam Elektrikli Araçlar
- Hibrit Elektrikli Araçlar
- Plug-in Hibrit Elektrikli Araçlar
- Yakıt Hücreli Elektrikli Araçlar (FCEV - Fuel Cell Electric Vehicle)

2.1. Tam Elektrikli Araçlar (BEV - Battery Electric Vehicle)

Tamamen elektrikle çalışan bu araçlar, enerji ihtiyaçlarını yalnızca bataryalardan karşılar. İçten yanmalı motorları bulunmayan bu araçlar, sıfır emisyon özelliğiyle çevre dostu bir seçenek sunar. Şarj edilebilir bataryaları sayesinde enerji depolayarak, elektrik motoruyla hareket ederler.



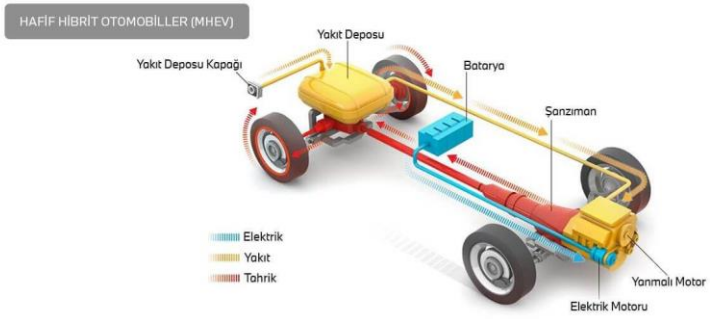
Şekil 2. Tamamen elektrikli araç yapısı

2.2. Hibrit Elektrikli Araçlar (HEV - Hybrid Electric Vehicle)

Hem içten yanmalı motor (İYM) hem de elektrik motoruna sahip olan hibrit araçlar, iki güç kaynağını bir arada kullanır. Bu araçlar, yakıt tasarrufu sağlarken düşük karbon salınımıyla çevresel etkileri azaltır. Ancak batarya kapasitesi sınırlı olduğu için tamamen elektrikle uzun mesafeler kat edemezler. Hibrit elektrikli araçlar çalışırken İYM ve elektrik motorunu aynı anda veya ayrı ayrı kullanılırlar. Araç bataryasının şarjı düşük olduğunda, içten yanmalı motorun devreye girmesi, sürüş menzilini önemli ölçüde uzatır (Polat ve ark., 2015). Hibrit elektrikli otomobilleri hafif hibrit (MHEV) ve Plug-in hibrit elektrikli otomobiller olarak iki başlık altında incelenebilir (BWM, Elektrikli otomobil öncüleri).

2.2.1. Hafif Hibrit Elektrikli Araçlar (MHEV)

Elektrikli motor, hafif hibrit araçlarda içten yanmalı motoru destekler ve özellikle kalkış anında yüksek yakıt tüketimi olduğunda devreye girer. Bu, aracın hızlanmasını sağlarken yakıt tüketimi ve emisyonları azaltır. Bataryalar, frenleme sırasında elde edilen enerjiyle otomatik olarak şarj olur ve dışarıdan enerji almaz.

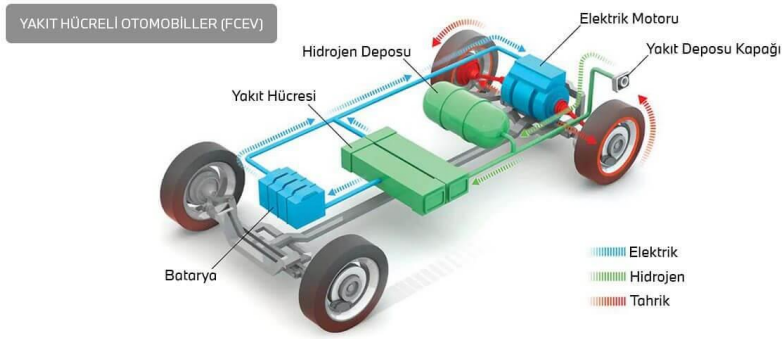


Şekil 3. Hafif hibrit elektrikli araç (MHEV)

Hafif hibrit araçlar, düşük yakıt tüketimiyle dikkat çeker. Bu araçların 100 kilometre başına yakıt tüketimi, benzinli araçlardan belirgin şekilde düşüktür ve daha uzun menzil sağlar. Ayrıca, yaygın olan benzin istasyonları, araçların yakıt ihtiyacını kolayca karşılamayı mümkün kılar. Daha az yakıt tüketimiyle emisyonlar da azalır, ancak elektrikli motor aracın tek başına çalışmasını sağlamaz. Bu yüzden hafif hibrit araçlar için elektrikli araçlara sunulan teşvikler geçerli değildir.

2.3. 1. Plug-in Hibrit Elektrikli Araçlar (PHEV - Plug-in Hybrid Electric Vehicle)

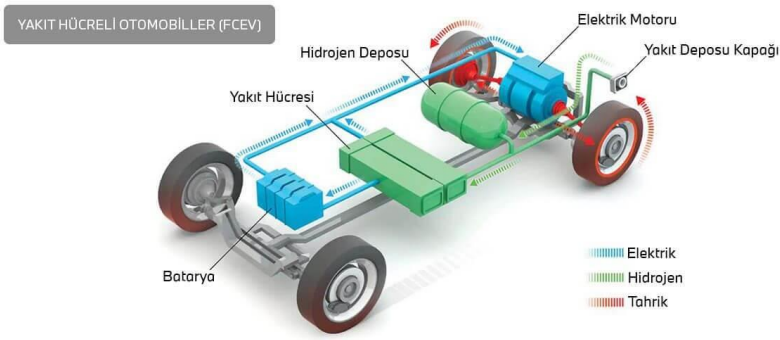
Geleneksel hibrit araçlardan farklı olarak, dışarıdan şarj edilebilir bir batar-yaya sahiptirler. Elektrik modunda daha uzun mesafeler kat edebilme yeteneği ile çevresel avantajlar sunar. İçten yanmalı motor ise elektrik enerjisi tükendiğinde devreye girer.



Şekil 4. Plug-in Hibrit elektrikli otomobil

2.4. Yakıt Hücreli Elektrikli Araçlar (FCEV - Fuel Cell Electric Vehicle)

Enerjilerini batarya yerine hidrojen yakıt hücrelerinden sağlayan bu araçlar, yüksek verimlilik ve sıfır karbon salınımı avantajlarıyla dikkat çeker. Yakıt hüc-resinde hidrojen ile oksijen reaksiyona girerek elektrik üretilir ve bu enerji, aracın hareket etmesi için elektrik motoruna iletilir.



Şekil 5. Yakıt hücreli elektrikli otomobil

3. Elektrikli Araç Şarj Teknolojisi

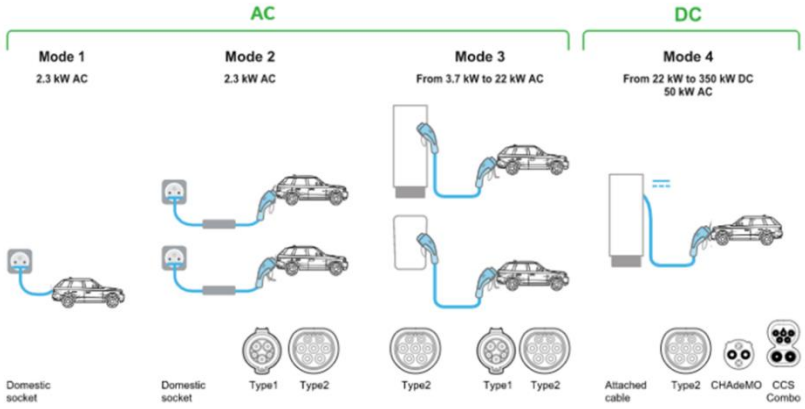
EA'lar bireysel veya ticari olarak kurulan şarj istasyonları üzerinden enerji sağlamaktadır. EA'lar elektrik şebekesi üzerinden şarj cihazları ile enerji aktarımı sağlanmaktadır. Bunu enerji aktarımında alternatif akım (AC) veya doğru akım (DA) enerji çıkışı sağlayan cihazlar kullanılmaktadır.

Elektrikli araç şarj istasyonları kuruluş şekline göre iki kısma ayrılabilir. Bunlar;

- Ticari şarj istasyonları
- Bireysel şarj istasyonları

Ticari şarj istasyonları bir şarj ağı işletmecisi tarafından EA'ları şarj etmek amacıyla ticari amaçla ve elektrik enerjisi satış bedeli karşılığında yapılan işlem olarak tanımlanabilir. AC veya DC şarj istasyonları kullanılarak yapılabilecek bir uygulamadır. Elektrikli araç kullanıcılarına şarj hizmeti sunan ve şarj ağı altyapısını işleten lisanslı tüzel kişiler, genellikle "şarj ağı işletmecisi" olarak adlandırılır. Bu işletmeler, şarj istasyonlarının yönetiminden, bakımından ve kullanıcılarla yapılan enerji satış süreçlerinden sorumludur. Ticari uygulamalar için Enerji Piyasası Düzenleme Kurulu (EPDK) tarafından yayınlanan ''Şarj Hizmeti Yönetmeliği'' hükümleri geçerli olmaktadır. Bu yönetmeliğe göre şarj ağı işletmecisi olmak için lisans almak gerekmektedir. Lisans almak isteyen tüzel kişiler, Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK) tarafından belirlenen usul ve esaslara uygun olarak gerekli bilgi ve belgeleri sunarak, EPDK Başvuru Sistemi üzerinden başvurularını gerçekleştirmelidir. Başvuru yapacak şirketin, Kurum nezdinde başvuruyu yapacak yetkilisini yazılı olarak bildirmesi gerekir. Bu bildirim sonrası, Kurum, başvuru yetkilisine elektronik başvuru yapma yetkisini en geç beş iş

günü içinde tanımlamaktadır. Lisans başvuru usülü ve tüm süreçler bu yönetmelikte anlatılmaktadır. Bireysel şarj istasyonları ise EA kullanıcıları tarafından kendi araçlarını şarj etmek amacıyla kullandıkları cihazlardır. Tamamen kullanıcının kendi isteğine bağlı olarak sektörde bulunan cihazlardan maliyet ve kullanıcı isteğine göre değişen özelliklerdeki cihazlar tercih edilebilir. Bunun yanı sıra kullanıcının mevcut altyapısı da bu tercihte etkilidir. Genel olarak 3,7-22 kW AC şarj cihazları tercih edilmektedir.Elektrikli araç şarj işlemleri farklı modlarda ve farklı standartlardaki soketlerle gerçekleştirilebilmektedir. Bu durum ülkelere göre de farklılık göstermektedir. Şekil 5'de modlar ve soketlerin bir özeti gösterilmiştir.



Şekil 5. Elektrikli araç şarj modları ve soket tipleri

Buradaki modlardan kısaca bahsetmek gerekirse mod 1, ev tipi olarak tercih edilen herhangi bir kontrolcü kullanılmadan priz üzerinden şarj etme işlemi olarak söylenebilir. Mod 2 ise, düşük güç çıkışlı bir kontrol cihazlı ve özel kablolu soket ile yine priz üzerinden şarj etme işlemi iken mod 3 ise en sık tercih edilen ve şarj istasyonu olarak söylenen AC cihazlar ve cihaz çıkışındaki soket ile direk araca bağlanan şarj işlemidir. Mod 4 ise DC bağlantı kullanarak hızlı şarj istasyonu işlemidir.

4. Elektrikli Araçlarda Kullanılan Motorlar

Elektrikli araç teknolojisinde, çekiş sistemi için genellikle beş farklı motor tipi tercih edilmektedir. Bu motorlar arasında Fırçalı DC Motorlar (DCM), Asenkron Motorlar (ACIM), Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motorlar (PMSM), Fırçasız DC Motorlar (BLDC) ve Anahtarlamalı Relüktans Motorlar (SRM) yer alır. Her bir motor tipi, tasarım özellikleri ve performans avantajlarıyla öne çıkmaktadır. Şekil

2, bu motorların iç yapısının karşılaştırmalı bir görünümünü sunmaktadır (Kaymaz ve ark., 2020).

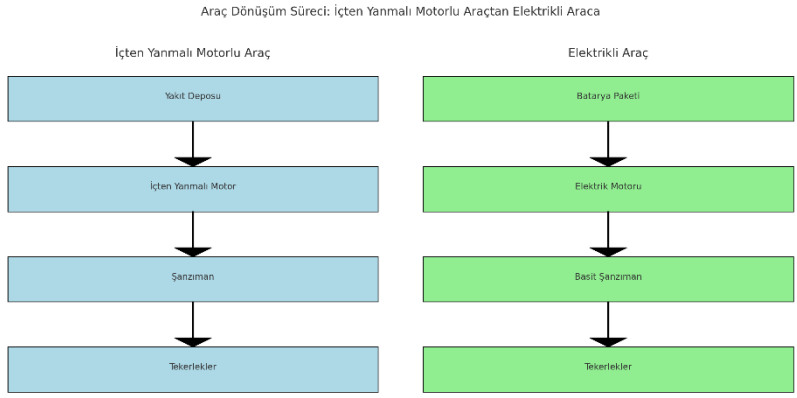
Fırçalı DC motorlar, yüksek başlangıç tork kapasitesiyle çekiş uygulamaları için idealdir. Hız kontrolü kolaydır ve ani yük değişimlerine dayanıklıdır, ancak mekanik fırçaların aşınması nedeniyle yüksek bakım gerektirir. Asenkron motorlar, elektromanyetik indüksiyon prensibine dayanır ve düşük maliyet, basitlik, düşük bakım avantajları sunar. Ancak hız kontrolünün zorluğu ve düşük verim gibi dezavantajları vardır. Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motorlar (PMSM), sabit mıknatıslar sayesinde soğutma avantajına sahip olup yüksek verim sunar. Ancak yüksek sıcaklık ve yük koşulları mıknatıslanmada kayba neden olabilir. Bu motor fırçasız DC motor ve endüksiyon motorunun birleşimi olarak söylenebilir (Porselvi ve ark.,2017). BLDC motorlar, kompakt yapılarıyla yüksek güç yoğunluğu ve verimlilik sunar. Ancak pahalı mıknatıs kullanımı nedeniyle maliyetlidir ve kontrol sistemleri karmaşıktır. SRM'ler, basit yapıları sayesinde yüksek hız ve moment avantajı sunar. Ancak yüksek gürültü seviyesi ve sensör ihtiyacı gibi dezavantajları bulunmaktadır. Bu motorların kullanıldığı otomotiv sektöründeki bazı araçlar Tablo 2'de gösterilmiştir.

Tablo 2. Otomotiv sektöründe kullanılan EA motor tipleri

Araç Marka ve Modeli	**Motor Türü**
NISSAN LEAF (2020)	PMSM
JAGUAR I-PACE (2020)	PMSM
TESLA MODEL S (2020)	ACIM
TESLA MODEL X (2020)	ACIM
TESLA MODEL 3 (2018)	ACIM
PORSCHE Mission E (2020)	ACIM
BMW i8 (2018)	PMSM
BMW i3 (2019)	PMSM
HYUNDAI KONA (2019)	PMSM
MERCEDES-BENZ GENERATION (2019)	ACIM
AUDI E-TRON 55 QUATRO (2019)	ACIM
VOLVO XC40 RECHARGE P8 (2021)	PMSM

5. İçten Yanmalı Motorlu Araçların Elektrikli Araçlara Dönüşümü

Günümüzde artan çevresel sorunlar ve fosil yakıt tüketiminin sürebilir olmaması, otomotiv sektörünü dönüşüme zorlamıştır. Elektrikli Araçlar (İngilizcesi EV) hem çevre dostu hem de ekonomik çözümler sunmaktadır. Bununla birlikte, içten yanmalı motorlu araçların (İYM) elektrikli araçlara dönüştürülmesi, hem ekonomik hem de mevcut otomobil envanterinin sürebilir kılınması açısından çekici bir seçenektir. Bu bölüm, içten yanmalı motorlu bir aracın elektrikliye dönüşümü sürecini teknik, ekonomik ve çevresel boyutlarıyla ele almaktadır (Pedrosa vd., 2014; Mengi, 2018). Teknik dönüşüm süreci Şekil 6'daki gibi özetlenebilir.



Şekil 6. Teknik dönüşüm süreci

5.1. Araç Seçimi

Dönüşüm için uygun bir aracın belirlenmesi, sürecin ilk adımıdır. Seçilecek olan aracın hafif olması, karmaşık elektronik sistemlere sahip olmaması ve uygun motor konfigürasyonu (tercihen arka tahrikli) gibi özellikler dikkate alınır. Bu noktada, aracın şasisinin dönüşüme uygun olması ve toplam ağırlık limitlerinin yasal düzenlemelere uygun şekilde korunması kritik bir öneme sahiptir (Vrazic vd., 2014; Altındal, 2015).

5.2. Elektrik Motoru Seçimi ve Entegrasyonu

Elektrikli motor, içten yanmalı motorun yerini alacak temel bileşendir. Genellikle sabit mıknatıslı senkron motorlar (PMSM) veya asenkron motorlar tercih edilir. Bu motorlar, yüksek verimlilik, dayanıklılık ve düşük bakım maliyetleri

sunar. Motor seçiminde, aracın hız-tork profilinin ve beklenen performansın detaylı bir analizle hesaplanması gerekir (Pedrosa vd., 2014; Rende vd., 2017).

5.3. Enerji Depolama Sistemi ve Batarya Yönetim Sistemi

Batarya paketi, aracın enerji kaynağını oluşturur. Lityum-iyon ve lityum-demir-fosfat (LiFePO4) bataryalar, yüksek enerji yoğunluğu ve uzun ve uzun ömürleri nedeniyle dönüşümler içmler i\xe7in yaygın olarak kullanılır. Bataryaların, şarj ve deşarj sırasında aşırı yüklenmesini önlemek için Batarya Yönetim Sistemi (BMS) entegre edilmelidir. BMS, bataryanın performansını optimize ederken termal kontrol ve enerji verimliliğini de sağlar (Altındal, 2015; Pedrosa vd., 2014).

5.4. Elektronik Sistemler ve Dönüşüm Teknolojileri

Elektrikli motorun sürülmesi için bir invertör ve motor kontrolü gereklidir. Özellikle, Alan Yönlendirme Kontrolü (Field Oriented Control - FOC) gibi ileri seviye kontrol algoritmaları, motorun hassas kontrolü ve enerji verimliliği sağlar. Araçlar, frenleme sırasında enerji geri kazanımı (regenerative braking) özelliği ile bataryaları yeniden şarj edebilir (Pedrosa vd., 2014; Rende vd., 2017).

5.5. Dönüşüm Sonrası Performans Testleri

Dönüşüm tamamlandıktan sonra aracın performansı detaylı bir test sürecinden geçirilmelidir. Bu testler, aracın enerji verimliliğini, menzilini, hız-tork performansını ve frenleme özelliklerini kapsar. Sonuçlar, dönüşümün başarılı bir şekilde tamamlandığını ortaya koymalıdır (Vrazic vd., 2014).

5.6. Ekonomik ve Çevresel Faydalar

Yakıt Tasarrufu: Elektrik, fosil yakıtlardan çok daha ekonomiktir. Ortalama 100 km başına maliyet, fosil yakıtlı bir aracın maliyetinin %20'sine kadar düşebilir (Mengi, 2018).

Bakım Maliyeti: Elektrikli motorlarda hareketli parçalar az olduğundan, yağ değişimi veya egzoz sistem bakımı gibi rutin işlemler gerekmez.

Yatırım Geri Dönüş Süreci: Elektrikli aracın dönüşümü, genellikle 3-5 yıl gibi kısa bir sürede kendini amorti eder (Altındal, 2015).

Emisyon Azalımı: Elektrikli araçlar, karbon emisyonlarının %100'ünü ortadan kaldırabilir (Rende vd., 2017).

Enerji Verimliliği: Elektrikli motorlar, içten yanmalı motorlara kıyasla enerji dönüşüm verimliliği çok daha yüksektir.

Hurdaların Değerlendirilmesi: Hurdaya ayrılmış araçların yeniden elektrikli hale getirilmesi çevre kirliliğini azaltır ve doğal kaynak tüketimini minimize eder (Altındal, 2015; Pedrosa vd., 2014).

6. Sonuç ve Gelecek Perspektifi

İçten yanmalı motorlu bir aracın elektrikliye dönüştürülmesi hem çevresel hem de ekonomik olarak büyük avantaj sağlar. Bu dönüşüm, mevcut teknolojilerle desteklenmekte ve yenilenebilir enerji kaynakları ile entegre edilerek karbon salınımını minimuma indirir. Gelecekte, bu teknolojinin yaygınlaşması için politikalar ve destek mekanizmaları kritik rol oynayacaktır. Elektrikli araçlara olan talebin artması, dönüşüm projelerinin de hız kazanmasını sağlayacaktır.

Ülkemizde İYM araçların EA'ya dönüştürülmesi süreci "Araçların İmal, Tadil ve Montajı Hakkında Yönetmelik" kapsamında değerlendirilmektedir. Bu yönetmeliğin dördüncü bölümünde Sadece elektrikli, hibrit elektrikli ve hibrit motorlu araçlardan bahsetmektedir. Bu bölümde madde 11'de elektrikli araçlara dönüşümün M ve N kategorisindeki araçlar için sadece araç üreticileri tarafından yapılabileceği söylenmektedir. İlerleyen yıllarda farklı uygulamalar ile bu çalışmalar geliştirilerek İYM araçların EA dönüşümünün çok daha yaygın hale geleceği düşünülmektedir. Ayrıca bu dönüşüm işleminde tüm aşamaların teknik şartnamelerde detaylı şekilde açıklanması gerekmektedir. Buna göre ruhsat tadilatı da yapılması gerecektir. Bu nedenle bu alandaki çalışmalar geleceğe oldukça faydalı olacaktır.

REFERANSLAR

Altındal, E. (2015). İçten Yanmalı Motorlu Hafif Binek Araçların Elektrikli Araçlara Dönüştürülmesi. Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Biçer C.G., Elektrikli Araçlar, Tubitak Bilim Teknik Dergisi, Nisan (2020). https://bilimteknik.tubitak.gov.tr/makale/elektrikli-araclar

BWM, Elektrikli Otomobil Türleri, 01.12.2024, https://bmwelektriginonculeri.com/elektrikli-otomobil-turleri#hev

Chan, C.C. (2013). The rise & fall of electric vehicles in 1828–1930: lessons learned, Proceedings of the IEEE, 101(1):206 – 212.

D. Pedrosa, V. Monteiro, H. Goncalves, J. S. Martins and J. L. Afonso, "A Case Study on the Conversion of an Internal Combustion Engine Vehicle into an Electric Vehicle," *2014 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, Coimbra, Portugal, 2014, pp. 1-5, doi: 10.1109/VPPC.2014.7006994.

Freescale, newest digital controller for energy conversion and motor control. Url, https://www.yumpu.com/en/document/ read/21059104/digital-control/5

Kaymaz, H., & Demir, M. F. (2020). Elektrikli Otomobiller için Çekiş Motor Tip Seçimi. International Periodical of Recent Technologies in Applied Engineering, 2(1), 35-41.

Kocabey, S. (2018). ELEKTRİKLİ OTOMOBİLLERİN DÜNÜ, BUGÜNÜ VE GELECEĞİ. Akıllı Ulaşım Sistemleri Ve Uygulamaları Dergisi, 1(1), 16-23.

Larminie, J., Lowry, J. (2003). Electric vehicle technology explained, John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England

Mengi, E. (2018). Dizel Bir Aracın Elektrikli Araca Dönüşüm Performansının Değerlendirilmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi Yüksek Lisans Tezi.

Ö.Polat, K.Yumak, M.S.Sezgin, G.Yumurtacı, Ö.Gül, "Elektrikli Araç ve Şarj İstasyonlarının Türkiye'deki Güncel Durumu" VI. Enerji Verimliliği, Kalitesi Sempozyumu, 4-6 Haziran 2015, İzmit.

Özbay, H., Közkurt, C., Dalcalı, A., Tektaş, M. (2020). Geleceğin Ulaşım Tercihi: Elektrikli Araçlar. Akıllı Ulaşım Sistemleri Ve Uygulamaları Dergisi, 3(1), 34-50.

Pedrosa, D., & Ark. (2014). A Case Study on the Conversion of an Internal Combustion Engine Vehicle into an Electric Vehicle. Renewable Energy Journal.

Rende, H., Yaldız, O., & Çağlar, A. (2015). Features of Converting a Car with an Internal Combustion Engine into an Electric Car. Journal of Automotive Engineering.

Singh, M. (2013). Green energy for metropolitan transport, International Journal on Power Engineering and Energy (IJPEE), 4(1):338-342.

T. Porselvi, Srihariharan , M. K, Ashok.J, Ajith Kumar. S, Selection of Power Rating of an Electric Motor for Electric Vehicles. Proceedings of the IJESC, 2017, Volume 7 Issue No.4

Türkiye İstastistik Kurumu, Trafiğe Kayıtlı Otomobillerin Yakıt Cinsine Göre Dağılımı, 01.12.2024, https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Motorlu-Kara-Tasitlari-Eylul-2024-53460

Uluslararası Enerji Ajansı, Global Elektrikli Araç Raporu, 11.11.2024, https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024

Vražić, M., & Ark. (2014). Study of a Vehicle Conversion from Internal Combustion Engine to Electric Drive. Mechanical Systems and Signal Processing Journal.

BÖLÜM 42

Savika: Yapay Zekâ Destekli İnsansız Kara Aracı Tasarım Programı

Cüneyd Demir [1] ***& Mustafa Bozdemir***[2]

[1] Öğr. Gör. Dr. Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Mucur Meslek Yüksekokulu, Bilgisayar Teknolojileri Bölümü, ORCID ID: 0000-0002-4628-7786
[2] Prof. Dr., Kırıkkale Üniversitesi, Kırıkkale Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü ORCID ID: 0000-0002-9332-2054

1. GİRİŞ

İşlemcilerin fiziksel boyutlarının küçülmesi ve kapasitelerinin artması, askeri teknolojilerde de etkisini göstermeye başlamış ve en temel silah sistemlerinin bile akıllı teknolojilere sahip olmasını mümkün kılmıştır. Ayrıca, savaşların giderek şehir içlerinde gerçekleştirilmesi, görevlerin artan karmaşıklığı ve kamuoylarının insan kayıplarına olan tepkisi, devletleri askeri operasyonlarda insansız sistemlere yönelmeye itmiştir. Bilimsel araştırmaların temel amacı hayatı kolaylaştırmak olmasına rağmen, bu araştırmalar sıklıkla askeri teknolojilerin geliştirilmesi için kullanılmış, maliyet düşürme amacındaki devletler de bu teknolojilerin bir kısmını sivil sektörün kullanımına sunmuştur. İnsansız sistemlerde askeri ve sivil maksatlı en çok faydalanılan sistem insansız kara araçlarıdır.

İnsansız kara aracı (İKA), geleceğin ordularında önemli bir rol oynaması beklenen otonom sistemler arasında yer alır. Bu araçlar, üzerlerinde bulunan elektronik görüş sistemleri, çeşitli sensörler ve uzaktan kumandalı silah sistemleri sayesinde savaş alanındaki riskleri minimize etmek ve herhangi bir tehdidi etkisiz hale getirmek amacıyla tasarlanmıştır. İnsansız kara aracının güncel tanımı, yüksek hareket kabiliyetine sahip ve dayanıklı bir platform üzerinde, göreve özgü çeşitli modüllerin eklenerek uyum sağlayabildiği bir araç olarak yapılabilir. Bu araçlar, ayarlanabilir otonomi düzeyleri ve modüler kontrol konsolları ile uzaktan yönetilebilir, zeminle temas ederek ilerleyen yeni nesil insansız araçlar olarak ifade edilir (Demir ve Bozdemir, 2019).

Yapılan literatür taraması, insansız kara araçları üzerine yapılan çalışmaların genellikle otonom hareket, engel algılama, yol planlaması, sensör entegrasyonu, tarım uygulamaları ve çeşitli endüstriyel alanlardaki kullanımlar gibi konulara odaklandığını göstermektedir. Bu çalışmada, insansız kara araçlarına yönelik bir tasarım programının geliştirilmesi, önemli bir eksikliği gidermekte ve yapay zekanın tasarım sürecinde kullanılması, çalışmayı özgün kılmaktadır. Son yıllarda insansız kara araçlarıyla ilgili gerçekleştirilen bazı önemli çalışmalar aşağıda sıralanmıştır.

Alinezhad ve arkadaşları (2024), insansız kara araçlarının kapalı alan çevresel kalite (IEQ) izleme alanında mekânsal verimliliği artırma ve tespit edilmeyen bölgeleri kapsama konusundaki potansiyelini değerlendirerek mevcut araştırma durumu, zorluklar ve gelecekteki yönelimleri incelemektedir. Çalışma, İKA navigasyonunun 3D çevre modelleriyle entegrasyonundan fayda sağlayabileceğini ve sensör performansının insan davranışları dikkate alınarak iyileştirilebileceğini vurgularken, IEQ izleme alanında İKA tabanlı mobil sensörlerin daha etkili uy-

gulanması için önemli araştırma alanlarını işaret etmektedir. Hinostroza ve arkadaşları (2023), açık deniz petrol ve gaz platformlarında insansız kara araçları kullanarak bakım ve denetim operasyonlarını otomatikleştirmeyi amaçlayan yenilikçi bir planlama sistemi sunmaktadır. Çalışma, İKA'ların beklenmedik durumlar karşısında yeniden planlama yapabilmesini sağlayarak, güvenlik, verimlilik ve maliyet açısından önemli iyileştirmeler sunarken, petrol ve gaz endüstrisinde daha otonom ve esnek operasyonlar gerçekleştirilmesine katkı sağlamaktadır.

Luo (2023), insansız kara araçları için çoklu sensör verilerinin entegrasyonunu optimize eden Multi-Sensor Collaborative Decision Network (MSCDN) adında bir ağ sunarak, İKA'ların dinamik ortamlarda daha doğru ve hızlı karar alabilmesini sağlamayı amaçlamaktadır. Çalışma, simülasyon ortamında geliştirilen bu çoklu sensör füzyon ağının gerçek ortama aktarılabilirliğini göstererek, İKA'ların ölçeklenebilirlik ve adaptasyon kabiliyetlerini artırmaktadır. Hu ve Assaad (2023), insansız hava araçları ve insansız kara araçlarının sivil altyapı sektöründeki (CIS) uygulamalarını, kullanılan sensörleri ve veri işleme yöntemlerini geniş kapsamlı bir şekilde inceleyerek, mevcut bilgi birikimini sistematik olarak özetlemektedir. Çalışma, CIS alanında İHA ve İKA'ların daha etkili kullanımı ve geliştirilmesi için mevcut zorlukları ve gelecekteki araştırma fırsatlarını vurgularken, araştırmacılara ve uygulayıcılara uzman bir kaynak sunmaktadır.

Selinova ve arkadaşları (2023), toprak katmanları içerisine gizlenmiş kayıp/terk edilmiş radyoaktif kaynakları tespit edebilme yeteneğine sahip bir CZT dedektörünün (kadmiyum çinko tellür) kullanımını incelemektedir. Çalışmada, CZT dedektörü bir insansız kara aracı üzerine yerleştirilmiş ve Monte Carlo simülasyonları ile desteklenen deneyler ile bu dedektörün minimum tespit edilebilir aktivite seviyeleri değerlendirilmiştir. Beycimen ve arkadaşları (2023), insansız kara araçlarının arazi geçiş kabiliyetinin değerlendirilmesi üzerine detaylı bir analiz sunmaktadır. Çalışmada, makine öğrenmesi, derin öğrenme ve pekiştirmeli öğrenme gibi yöntemlerle arazi sınıflandırması, haritalama ve maliyet tabanlı geçiş analizleri incelenmiş; farklı sensör teknolojilerinin kullanımı ve araç platformlarının rolü ele alınmıştır.

Chen ve arkadaşları (2024), değişken dingil mesafeli altı tekerlekten bağımsız sürüşe sahip bir insansız kara aracının dönüş sırasında ortaya çıkan araç stabilite sorunlarını ve tekerlek kaymasını azaltmayı amaçlayan bir hiyerarşik koordinasyonlu kontrolör önermektedir. Çalışmada, aracın devrilme stabilitesini sağlamak için adaptif yüksek dereceli bağlama faktörü ile integral kayma modlu bir kontrolör ve tekerlek tork dağılımını optimize etmek için iyileştirilmiş parçacık sürü optimizasyonu algoritması kullanılmıştır. An ve arkadaşları (2023), tarımsal faaliyetlerin karbon emisyonlarını azaltmak için biyokömür uygulamasını insansız

hava araçları ve insansız kara araçları kullanarak optimize eden bir sistem önermektedir. Sistem, İHA'nın hareket halindeki bir İKA üzerine inip uzun menzilli bilgi toplamasını ve İKA'nın çeşitli yük seçenekleriyle İHA'nın sensör ve hareket görevlerini desteklemesini sağlar; sonuçlar, bu yaklaşımın hassas iniş kontrolünde ve yükseklik hesaplamasında yüksek doğruluk sağladığını göstermektedir.

Lu ve arkadaşları (2023), güçlü doğrusal olmayan yapıya sahip dağıtılmış tahrikli insansız kara araçlarının dinamik modellemesini, değişken yapısal parametreler ve arazi belirsizliklerini dikkate alarak geliştirmeyi amaçlamaktadır. Çalışmada, araç-teker-arazi etkileşim modelinin oluşturulmasıyla, karmaşık çevrelerde İKA'ların dinamik modelleme, sürüş karakteristikleri analizi ve kontrol stratejileri araştırmalarına katkı sağlanmaktadır. Lu ve arkadaşları (2024), değişken dingil mesafesine sahip insansız kara araçlarının yön takibi performansını optimize etmek için dingil mesafesi değişikliklerine dayalı uyarlanabilir bir kontrol stratejisi önermektedir. Çalışma, farklı araç konfigürasyonlarına ve görev gereksinimlerine göre manevra kabiliyeti ve stabiliteyi sağlayarak insansız kara araçlarının performansını artırmayı hedeflemektedir.

Lu ve arkadaşları (2024), değişken konfigürasyonlara sahip dağıtılmış tahrikli insansız platformların çoklu tekerlek tork dağılımını optimize ederek yüksek performanslı diferansiyel direksiyon ve araç dinamiklerini iyileştirmeyi amaçlayan uyarlanabilir bir kontrol stratejisi sunmaktadır. Çalışma, konfigürasyon değişikliklerinin direksiyon performansına etkilerini analiz ederek, lastik enerji kaybı ve yük oranını optimize eden hiyerarşik bir diferansiyel direksiyon stratejisi ile sürüş stabilitesini artırmayı hedeflemektedir. Jiang ve arkadaşları (2022), değişken konfigürasyona sahip insansız kara araçlarının yol takip kontrol stratejisini geliştirmek için model gerektirmeyen bir öngörülü kontrol (MFAPC) stratejisi sunmaktadır. Çalışma, yapısal belirsizlikleri aşarak referans yolu hızlı ve hassas bir şekilde takip edebilmek için parçacık sürü optimizasyonu (PSO) ile kontrol şemasını iyileştirip optimize ederek yüksek mobilite ve zeka hedeflerine katkı sağlamaktadır.

Qi ve arkadaşları (2021), akıllı şehirlerin yeraltı alanlarında acil durum tespiti ve müdahalesi için, arama kurtarma görevlerinde kullanılabilecek yeni bir araziye uyumlu her yöne hareket edebilen insansız kara aracı sunmaktadır. Önerilen sistem, karmaşık yeraltı ortamlarında engelleri tespit edebilme, zorlu arazilerde pasif geçiş ve aktif tırmanma yeteneği sağlama, tehlikeli maddeleri ve toksik gazları toplama gibi özellikleriyle yeraltı acil durum müdahalelerinde önemli bir çözüm sunmaktadır. Krecht ve arkadaşları (2023), insansız kara araçlarının dayanıklılığını analiz etmek için genel uygulanabilir bir yöntem sunarak hem komple sistemler hem de alt sistemler için dayanıklılık ölçümüne yönelik bir metodoloji

geliştirmeyi amaçlamaktadır. İKA'ların dayanıklılığını süreç grafikleri kullanarak değerlendiren bu yöntem, görev başarısızlıkları ve olası kayıpların önüne geçilmesine katkı sağlayarak, kritik operasyonlarda güvenilirlik sağlamaktadır.

Liu ve arkadaşları (2022), holonomik olmayan insansız kara araçlarının formasyon kontrolünü, unscented Kalman filtre tabanlı sensör füzyonu yaklaşımıyla incelemektedir. Çalışma, fiziksel liderli bir formasyon modeli kullanarak, hata dinamik sisteminin kararlılığını Lyapunov fonksiyonu ile sağlamayı ve takipçilerin durumsal tahmin algoritmasıyla formasyonu optimize etmeyi hedeflemektedir, bu da daha gerçekçi ve etkili bir formasyon kontrolü sunmaktadır. Von Ellenrieder ve arkadaşları (2022), Bu makale, tek bir kişinin insansız kara aracının yol takibini paylaşmalı olarak kontrol edebilmesi için insan niyetini pasif olarak ölçerek insan ve makine girdilerini harmanlayan bir kontrol stratejisi sunmaktadır. Önerilen yöntem, insan ve otomatik kontrolörün birleşik sinyallerinin makine aktüatör sınırlarına uygun olmasını sağlarken, paylaşımlı kontrol deneyleri ile yöntem, belirli bir yol deseni üzerinde başarıyla test edilmiştir.

Xu ve arkadaşları (2023), altı tekerlekten bağımsız tahrikli insansız kara aracının direksiyon sırasında yan stabiliteyi sağlarken lastik aşınmasını ve motor enerji tüketimini azaltmayı amaçlayan hiyerarşik bir kontrolör sunmaktadır. Çalışma, kayma enerjisi kaybını optimize eden ve ekonomik faydalar sağlayan bu kontrol stratejisiyle, direksiyon manevraları sırasında lastik aşınmasını önemli ölçüde azaltarak aracın stabilitesini ve verimliliğini artırmaktadır. Wang ve arkadaşları (2021), insansız kara araçlarının boylamsal ve yanal kontrolü için bozucu gözlemci tabanlı bir kontrol stratejisi önermektedir. Çalışma, toplam bozucuları tahmin ederek kapalı çevrim sistemin dayanıklılığını artıran ve gerçekçi kısıtları dikkate alan bir model ile, kontrol stratejisinin etkinliğini hem sayısal hem de deneysel sonuçlarla kanıtlamaktadır.

Gadekar ve arkadaşları (2023), tehlikeli ortamlarda gerçek zamanlı gözetim ve küçük yük taşıma operasyonları için 360° kapsama sağlayan modüler bir insansız kara aracı olan Rakshak'ın tasarımını ve geliştirilmesini ele almaktadır. İKA'nın modüler yapısı, farklı uygulamalara kolayca uyum sağlama esnekliği sunarken, haritalama ve veri toplama işlemlerinde güvenilir iletişim yöntemleri kullanılarak insan hatalarını en aza indirgemeyi amaçlamaktadır. Shen ve arkadaşları (2023), karmaşık ortamlarda minimal ve yüksek hızlı iş birliğine dayalı navigasyon için hava-karada insansız araçların etkili bir şekilde göreceli konumlandırma ve nesne tespiti yapabilmesi amacıyla AeroNet adında bir ağ önermektedir. Mikro insansız hava araçlarının kısıtlı hesaplama kapasitesini göz önünde bulundurarak geliştirilen bu ağ, yüksek doğruluk ve düşük hesaplama süresi sunarak gerçek zamanlı hesaplama gereksinimlerini karşılayabilmektedir.

Zhou ve arkadaşları (2024), yüksek dağ vadilerinde heyelan deformasyonunu izlemek için TLS ve İHA tabanlı bir yöntem önererek, karmaşık arazi koşulları ve sınırlı erişim gibi zorlukları aşmayı hedeflemektedir. Çalışma, düşük hassasiyetli kontrol noktaları ve varsayılan kontrol noktalarını kullanarak yüzey deformasyon analizinde yüksek doğruluk elde edilmesini sağlayarak, geleneksel yöntemlerle karşılaştırıldığında heyelan izleme hassasiyetini artırmaktadır. Fan ve arkadaşları (2024), dört tekerlekli araçlar için olasılıksal yol haritası (PRM) ve derin deterministik politika gradyanı yöntemlerini birleştirerek, mevcut yol planlama sorunlarına çözüm sunan hiyerarşik bir yol planlama yöntemi önermektedir. Çalışma, karmaşık ortamlarda hem kısa hem de düzgün yollar oluştururken, araçların non-holonomik kısıtlarını ve engel kaçınma gereksinimlerini dikkate alarak geleneksel ve en güncel yöntemlere kıyasla daha üstün performans sağlamaktadır.

Yang ve arkadaşları (2021), çoklu sensör veri füzyonuna dayalı bir sürüş destek sistemi geliştirerek otonom insansız kara araçlarının çevresel durumu çok yönlü ve gerçek zamanlı olarak algılamasını sağlamayı amaçlamaktadır. Çalışma, fisheye kameralar, ultrasonik radarlar, düşük ışık kameraları ve lidar sensörlerinin birleşik kullanımını içeren yenilikçi algoritmalarla, otonom araçların çevre algılama ve nesne tespiti performansını önemli ölçüde artırmaktadır. Ibrahim ve arkadaşları (2023), kapalı alanlarda yüksek kaliteli görsel veri toplamak için kamera donanımlı insansız kara araçları kullanarak veri toplama politikalarını optimize eden bir pekiştirmeli öğrenme modeli sunmaktadır. Çalışma, dar ve dinamik inşaat alanlarında veri toplama süresini ve mesafesini önemli ölçüde azaltarak mevcut otomatik stratejilere kıyasla daha verimli ve doğru bir veri toplama yöntemi sağlamaktadır.

2. SAVİKA: YAPAY ZEKA DESTEKLİ İKA TASARIM PROGRAMI

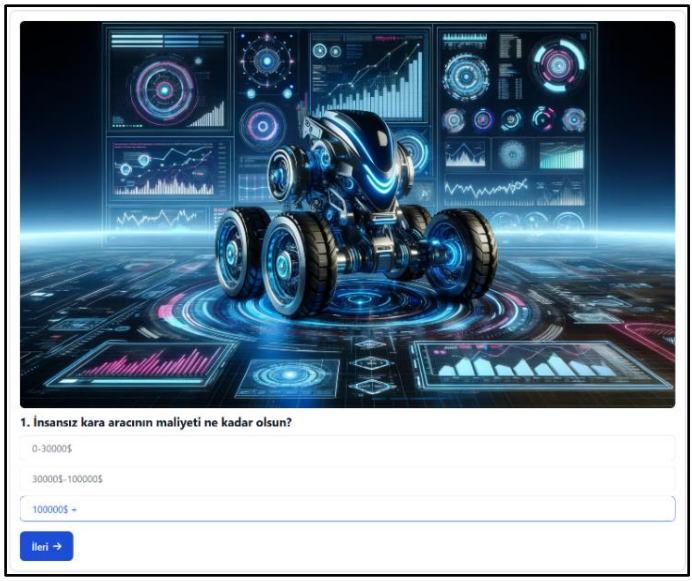
SAVİKA, insansız kara araçlarının tasarımı için geliştirilen bir bilgisayar programıdır ve geliştirme sürecinde Visual Studio Code (VS Code) kullanılmıştır. VS Code'un tercih edilmesinde, sunduğu teknik avantajlar önemli bir rol oynamıştır. Çoklu dil desteği sayesinde, HTML, CSS, JavaScript ve PHP gibi dillerde etkin kod yazma imkanı sunarak web tabanlı arayüzlerin ve işlevlerin geliştirilmesine katkı sağlamaktadır. Ayrıca, gelişmiş veri işleme tekniklerinin entegrasyonu için uygun bir platform sunması, program geliştirme sürecini desteklemektedir. VS Code'un Microsoft Windows gibi yaygın işletim sistemleriyle uyumlu olması, programın daha geniş bir kullanıcı kitlesi tarafından erişilebilir olmasını sağlamaktadır.

SAVİKA programında makine öğrenmesi uygulamaları için Anaconda platformunun Jupyter Notebook aracı tercih edilmiştir. Jupyter Notebook, veri analizi ve makine öğrenmesi kodlarının interaktif bir şekilde yazılması, test edilmesi ve görselleştirilmesi için uygun bir ortam sunarak karmaşık algoritmaların doğrulanmasını ve veri işleme süreçlerinin görselleştirilmesini kolaylaştırmaktadır. Programın insansız kara aracının tasarımına yönelik bölümünde ise SolidWorks kullanılmıştır. SolidWorks, 3D modelleme, simülasyon ve ürün tasarımı gibi özellikler sunan güçlü bir CAD (Bilgisayar Destekli Tasarım) yazılımıdır. Bu araçların kullanımı, SAVİKA programının geliştirilmesinde veri yönetimi, algoritma uygulama ve tasarım süreçlerini desteklemiş, böylece projenin akademik ve teknik gereksinimlerini karşılamıştır.

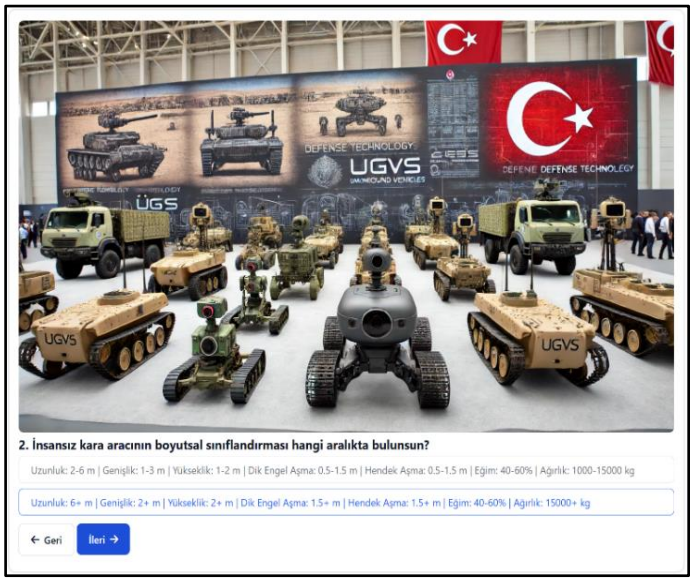
Makine öğrenmesi, uygun alternatiflerin oluşturulabilmesi için tasarımcıdan veya müşteriden belirli bilgilerin sağlanmasını talep etmektedir. Bu süreç, tasarımın gereksinimlere uygun şekilde şekillendirilmesini sağlamakta ve veriye dayalı, optimize edilmiş tasarım kararlarının alınmasına olanak tanımaktadır.

İnsansız kara aracının tasarımı sürecinde, uygun alternatiflerin belirlenebilmesi için tasarımcı veya müşteriden belirli bilgiler talep edilmektedir. Bu bilgiler arasında aracın maliyet düzeyi (düşük, orta, yüksek) ve boyutsal sınıflandırması (hafif, küçük, orta, ağır) yer almaktadır. Ayrıca, aracın özerklik seviyesi (1. seviye, 2. seviye, 3. seviye) ve kapsama alanı (örneğin, $x<2$ km², $x<5$ km², x km²) gibi teknik özellikler de tasarım sürecinde dikkate alınmaktadır. Araçtan beklenen görev türü (keşif-gözetleme ve istihbarat, bomba imha, saldırı ve geri emniyet, lojistik, mayın ve engel temizleme) ve kullanılacak motor tipi (0-20 kw, 20-75 kw, 75-300 kw, 300+ kw, 25-100 Hp, 100-400 Hp, 400+ Hp, 25-100 Hp + 0-20 kw, 100-400 Hp + 20-75 kw ve 400+ Hp + 75+ kw gibi çeşitli güç aralıkları) de bu kapsamda tanımlanmalıdır. İnsansız kara aracının kullanılacağı arazi tipi (düz sert zemin, düz yumuşak zemin, engebeli sert zemin ve engebeli yumuşak zemin) ve manevra kabiliyeti (geniş, orta veya dar dönüş yarıçapı) ise tasarım kararlarının arazinin ve görev ihtiyaçlarının gereksinimlerine uygun şekilde şekillendirilmesini sağlamaktadır.

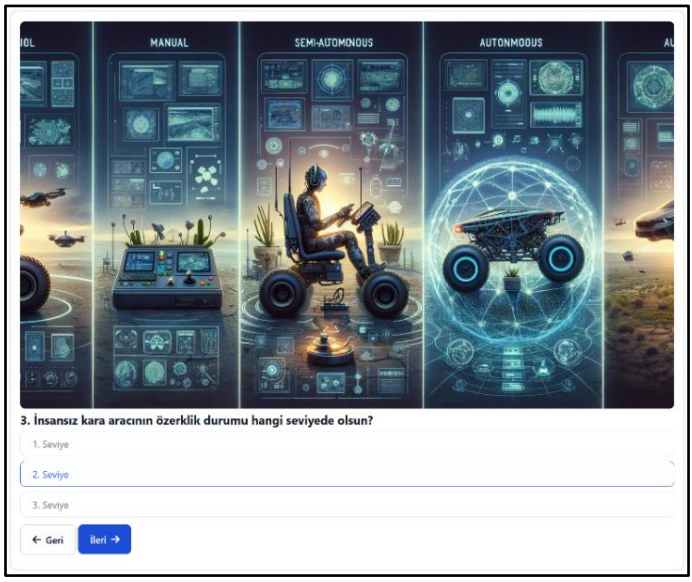
2.1. Uygulama



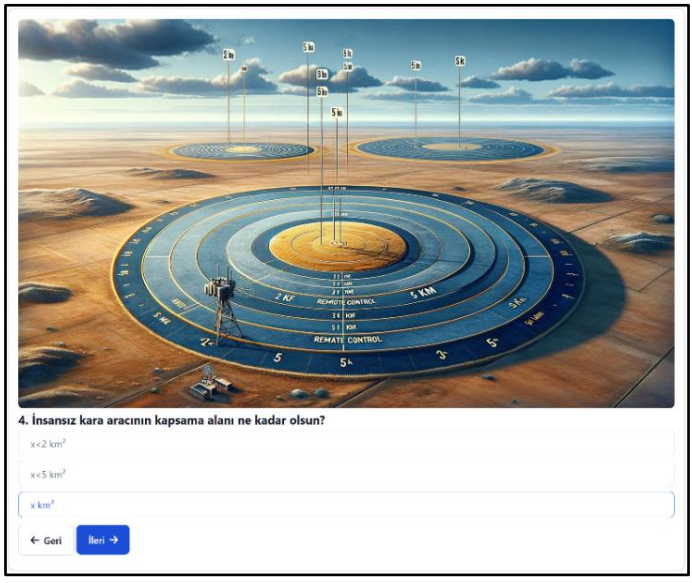
Şekil 1. İKA maliyet seçimi



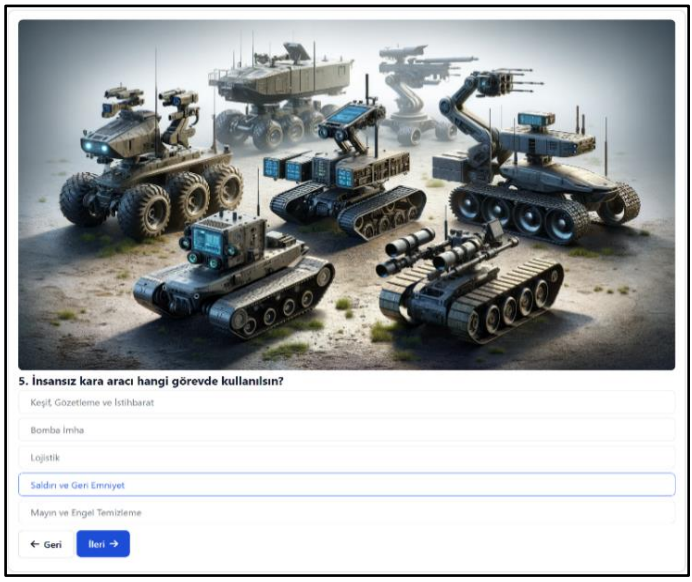
Şekil 2. İKA boyutsal sınıflandırma seçimi



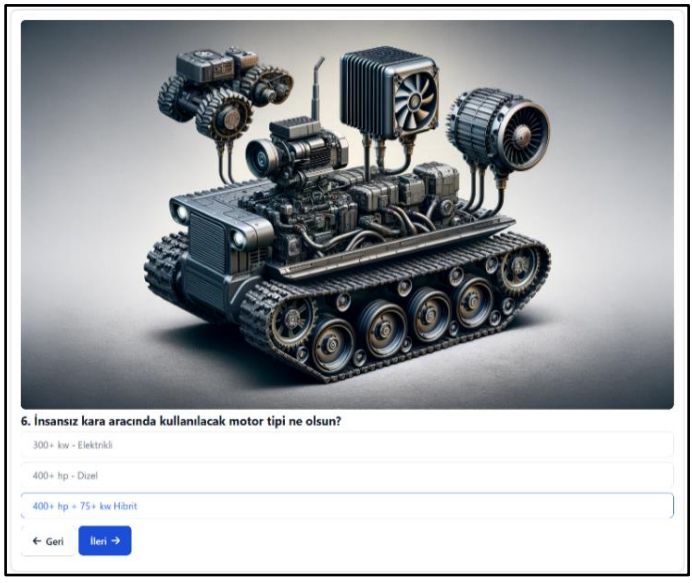
Şekil 3. İKA özerlik seviyesi seçimi



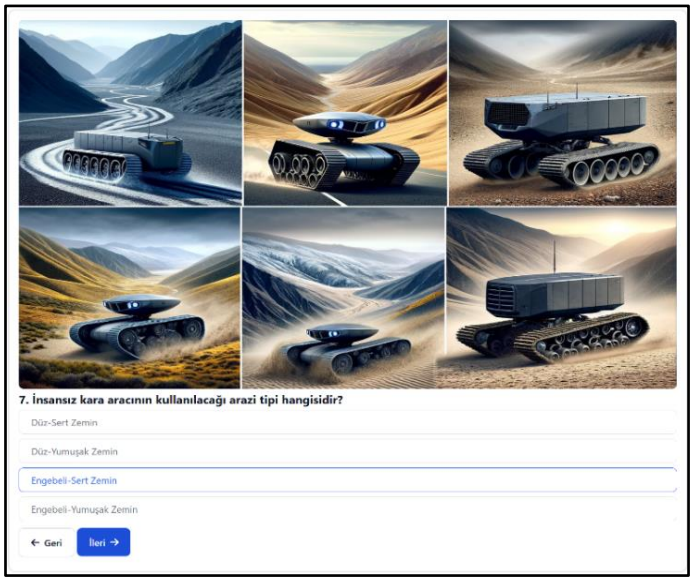
Şekil 4. İKA kapsama alanı seçimi



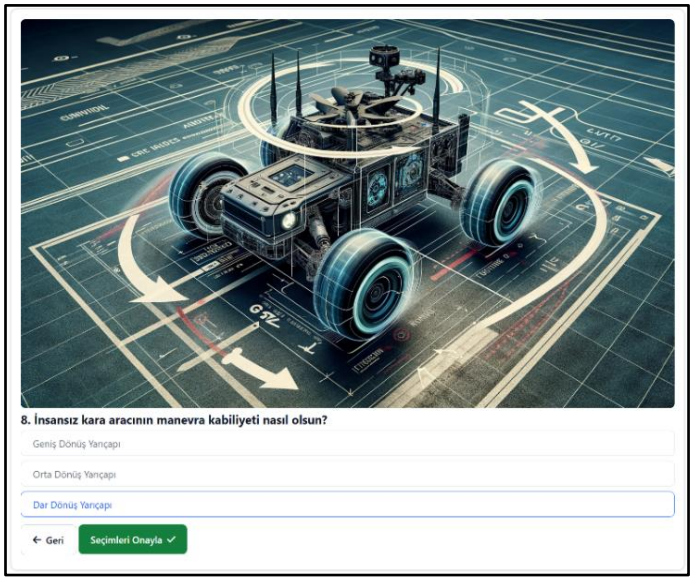
Şekil 5. İKA görev maksadı seçimi



Şekil 6. İKA motor tipi seçimi



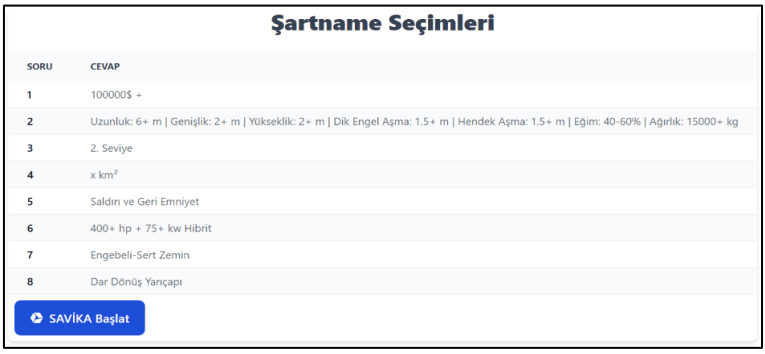
Şekil 7. İKA arazi tipi seçimi



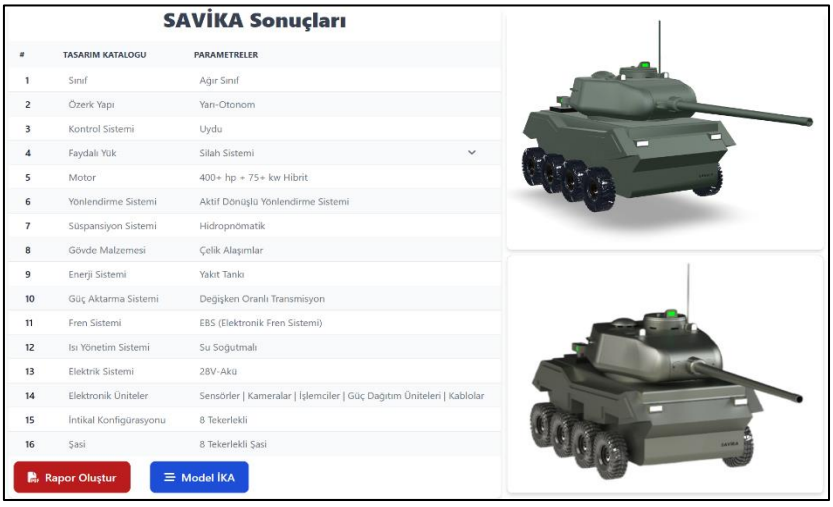
Şekil 8. İKA manevra kabiliyeti seçimi

Şekil 1'den Şekil 8'e kadar cevaplanan sorular, insansız kara aracının tasarımını etkileyen ana parametreler olarak işlev görür ve tasarıma yönelik kararlar bu parametrelere bağlı olarak şekillendirilir. Bu sistemli yaklaşım, tasarım sürecinin verimliliğini ve etkinliğini artırmaktadır.

Tasarımcı veya müşteri tarafından seçim işlemi yapılan 8 soru sonucunda sıraya uygun bir şekilde verdiği cevaplar çizelgeleştirilmektedir (Şekil 9). "SAVİKA Başlat" butonu ile yapay zeka işlemi başlamaktadır. Başlayan işlem sonucunda 15 mekanik parametre arasından kullanıma en uygun parametre çeşitleri saptanmaktadır. 2B ve 3B görselleri ile en iyi alternatifin sembolik görseli ortaya çıkarılmaktadır.



Şekil 9. SAVİKA seçimler çizelgesi



Şekil 10. SAVİKA sonuçlar

3. SONUÇ VE TARTIŞMA

Gelişen bilgisayar teknolojileri, birçok sektörde olduğu gibi insansız sistemlerin evriminde de önemli bir rol oynamıştır. Robot teknolojisinin hayatımıza girmesiyle birlikte, insansız kara araçlarına olan ihtiyaç sürekli artmaktadır. Gün geçtikçe, insansız kara araçları üzerinde daha fazla araştırma yapılmaktadır. Bu araçlar; keşif, gözetleme ve istihbarat faaliyetlerinde, saldırı ve savunma operasyonlarında, terörle mücadelede, mayın temizleme ve bomba imha görevlerinde, sınır devriyelerinde, rutin ve tekrarlanan görevlerde, lojistik destek sağlamada, uzay araştırmalarında ve bilimsel uygulamalarda kullanılmaktadır.

İnsansız kara aracı tasarımını gerçekleştiren yapay zeka algoritmaları, tasarım sürecindeki büyük veri yığınlarını analiz ederek daha hızlı ve doğru kararlar alınmasını sağlar, böylece tasarım süresini kısaltarak daha etkili araçların geliştirilmesine olanak tanır. Geleneksel tasarım yöntemlerine kıyasla daha az insan müdahalesi gerektiren bu süreç, hata oranını azaltarak hem maliyetlerin düşürülmesine hem de zamanın daha verimli kullanılmasına katkı sağlar. Ayrıca, yapay zeka tabanlı bu program, savunma ve endüstri alanlarında teknolojik dönüşümün önemli bir parçası olarak inovasyonu teşvik eder ve gelecekteki gelişmelere zemin hazırlayarak sektörde yeni ufuklar açar.

SAVİKA programının başlatılmasıyla birlikte, makine öğrenmesi teknikleri kullanılarak elde edilen sonuçlar, kullanıcı tercihlerine bağlı olarak en iyi alternatifi sunmaktadır. Bu süreç, kullanıcıların seçimlerine dayanarak, optimize edilmiş tasarım alternatiflerini dinamik bir şekilde değerlendirmelerini ve seçmelerini sağlar. Bu, kullanıcıların ihtiyaçlarına en uygun çözümleri belirlemelerine olanak tanıyan veriye dayalı bir karar destek sistemidir. SAVIKA sonuçlar sayfası, insansız kara araçları için geliştirilen tasarımlara ilişkin kapsamlı bilgiler sunmaktadır. Bu sayfada, aracın mekanik parametrelerine dair detaylı analizler sunulurken, aynı zamanda 2 ve 3 boyutlu görsellerle desteklenen en iyi alternatifin sembolik tasarımı da sergilenmektedir. Ayrıca, bu sayfada tasarım katalogu üzerinden en iyi alternatifin modeline de ulaşabilmektedir. Rapor bilgisi hazırlama aşamasında, tasarımın tüm detayları ve elde edilen sonuçlar belgelenir. SAVİKA programı internet sitesine dönüştürülerek kullanıma açılmıştır. https://savika.cuneyddemir.net adresinden kullanımı sağlanmaktadır.

KAYNAKLAR

Demir, C. ve Bozdemir, M. (2019). İnsansız kara aracı tasarımında ağırlık oranı metodu kullanımı. Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 5(1), 32-45.

Alinezhad, E., Gan, V. V., Chang W. and Zhou J. (2024). Unmanned Ground Vehicles (UGVs)-based mobile sensing for Indoor Environmental Quality (IEQ) monitoring: Current challenges and future directions. Journal of Building Engineering, vol. 88. Doi: 10.1016/j.jobe.2024.109169.

Hinostroza, M. A., Lekkas, A. M., Transeth, A. A., Luteberget, B., de Jonge C. and Sagatun, S. I. (2023). Automated planning for inspection and maintenance operations using unmanned ground vehicles. IFAC-PapersOnLine, vol. 56, no.2, pp. 7873-7879. Doi: 10.1016/j.ifacol.2023.10.022.

Luo, M. (2023). Multi-sensor-based strategy learning with deep reinforcement learning for unmanned ground vehicle. International Journal of Intelligent Networks, vol. 4, pp. 325-336. Doi: 10.1016/j.ijin.2023.11.003.

Hu, X. and Assaad, R. H. (2023). The use of unmanned ground vehicles (mobile robots) and unmanned aerial vehicles (drones) in the civil infrastructure asset management sector: Applications, robotic platforms, sensors, and algorithms. Expert Systems with Applications, vol. 232. Doi: 10.1016/j.eswa.2023.120897

Selivanova, A., Hůlka, J., Rubovič, P., Kuča, P., Drahokoupil, M., Valdezová, P. and Helebrant, J. (2023). Identification of shielded sources using a CZT detector and an unmanned ground vehicle. Radiation Physics and Chemistry, vol. 209. Doi: 10.1016/j.radphyschem.2023.110963

Beycimen, S., Ignatyev D. and Zolotas, A. (2023). A comprehensive survey of unmanned ground vehicle terrain traversability for unstructured environments and sensor technology insights. Engineering Science and Technology, an International Journal, 47.Doi: 10.1016/j.jestch.2023.101457.

Chen, G., Gao, X., Zhao, Y., Xu X. and Jiang Y. (2024) "Attitude stability control for 6WID unmanned ground vehicle during steering: A collaborative controller considering minimizing tire slip energy loss". Energy, vol. 302. Doi: 10.1016/j.energy.2024.131918.

An, D., Krzysiak, R., Hollenbeck D. and Chen, Y. (2023). Long Endurance Site-Specific Management of Biochar Applications Using Unmanned Aircraft Vehicle and Unmanned Ground Vehicle. IFAC-PapersOnLine, vol. 56, no. 2, pp. 8908-8913. Doi: 10.1016/j.ifacol.2023.10.094.

Lu, S., Xu, X. and Wang, W. (2023). Coupling dynamic model of vehicle-wheel-ground for all-terrain distributed driving unmanned ground vehicle. Simulation modelling practice and theory, vol. 128. Doi: 10.1016/j.simpat.2023.102817.

Lu, S., Jiang, Y., Xu, X., Qian H. and Zhang, W. (2024). Adaptive heading control strategy for unmanned ground vehicle with variable wheelbase based on robust-active disturbance rejection control. Control Engineering Practice, vol. 142. Doi: 10.1016/j.conengprac.2023.105786.

Lu, S., Jiang, Y., Zhang L. and Xu, X. (2024). Adaptive differential steering strategy for distributed driving unmanned ground vehicle with variable configurations based on modified localized modelling sliding mode control. ISA transactions, vol. 151, pp. 391-408. Doi: 10.1016/j.isatra.2024.05.045.

Jiang, Y., Xu, X., Zhang L. and Zou, T. (2022) Model free predictive path tracking control of variable-configuration unmanned ground vehicle", ISA transactions, vol. 129, part A, pp. 485-494. Doi: 10.1016/j.isatra.2022.01.026.

Qi, L., Zhang, T., Xu, K., Pan, H., Zhang Z. and Yuan, Y. (2021). A novel terrain adaptive omni-directional unmanned ground vehicle for underground space emergency: Design, modeling and tests. Sustainable Cities and Society, vol. 65. Doi: 10.1016/j.scs.2020.102621.

Krecht, R., Suta, A., Tóth Á. and Ballagi, Á. (2023). Towards the resilience quantification of (military) unmanned ground vehicles. Cleaner Engineering and Technology, vol. 14, Doi: 10.1016/j.clet.2023.100644.

Liu, Z., Li, Y., Wu Y. and He, S. (2022). Formation control of nonholonomic unmanned ground vehicles via unscented Kalman filter-based sensor fusion approach. ISA transactions, vol. 125, pp. 60-71. Doi: 10.1016/j.isatra.2021.07.012.

von Ellenrieder, K. D., Licht, S. C., Belotti R. and Henninger, H. C. (2022). Shared human–robot path following control of an unmanned ground vehicle. Mechatronics, vol. 83. Doi: 10.1016/j.mechatronics.2022.102750.

Xu, X., Chen, G., Gao, X., Jiang Y. and Feng, Y. (2023). Stability and energy-saving coordinated control strategy of six-wheel independent drive unmanned ground vehicle. ISA transactions, vol. 143, pp. 692-706. Doi: 10.1016/j.isatra.2023.10.001.

Wang, H., Zuo, Z., Wang, Y., Yang H. and Chang S. (2021). Composite nonlinear extended state observer and its application to unmanned ground vehicles. Control Engineering Practice, vol. 109, Doi: 10.1016/j.conengprac.2021.104731.

Gadekar, A., Fulsundar, S., Deshmukh, P., Aher, J., Kataria, K., Patel, V. and Barve, S. (2023). Rakshak: A modular unmanned ground vehicle for surveillance and logistics operations. Cognitive Robotics, vol. 3, pp. 23-33. Doi: 10.1016/j.cogr.2023.02.001.

Shen, K., Zhuang, Y., Chen, Y., Zuo S. and Liu, T. (2024). AeroNet: An efficient relative localization and object detection network for cooperative aerial-ground unmanned vehicles. Pattern Recognition Letters, vol. 171, pp. 28-37, Doi: 10.1016/j.patrec.2023.05.008.

Zhou, J., Jiang, N., Li, C. and Li, H. (2024). A landslide monitoring method using data from unmanned aerial vehicle and terrestrial laser scanning with insufficient and inaccurate ground control points. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, Doi: 10.1016/j.jrmge.2023.12.004.

Fan, J., Zhang, X., Zheng, K., Zou Y. and Zhou, N. (2024). Hierarchical path planner combining probabilistic roadmap and deep deterministic policy gradient for unmanned ground vehicles with non-holonomic constraints. Journal of the Franklin Institute, vol. 361, no. 8. Doi: 10.1016/j.jfranklin.2024.106821.

Yang, J., Liu, S., Su, H. and Tian, Y. (2021). Driving assistance system based on data fusion of multisource sensors for autonomous unmanned ground vehicles. Computer Networks, vol. 192. Doi: 10.1016/j.comnet.2021.108053.

Ibrahim, A., Torres-Calderon W. and Golparvar-Fard, M. (2023). Reinforcement learning for high-quality reality mapping of indoor construction using unmanned ground vehicles. Automation in Construction, vol. 156. Doi: 10.1016/j.autcon.2023.105110.

BÖLÜM 43

İnsansız Kara Araçları için Tasarım Katalogu Geliştirilmesi

Cüneyd Demir [1]

[1] Öğr. Gör. Dr. Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Mucur Meslek Yüksekokulu, Bilgisayar Teknolojileri Bölümü, ORCID ID: 0000-0002-4628-7786

1. GİRİŞ

İnsansız kara aracı, geleceğin ordularında önemli bir rol oynaması beklenen otonom sistemler arasında yer alır. Bu araçlar, üzerlerinde bulunan elektronik görüş sistemleri, çeşitli sensörler ve uzaktan kumandalı silah sistemleri sayesinde savaş alanındaki riskleri minimize etmek ve herhangi bir tehdidi etkisiz hale getirmek amacıyla tasarlanmıştır. İnsansız kara aracının güncel tanımı, yüksek hareket kabiliyetine sahip ve dayanıklı bir platform üzerinde, göreve özgü çeşitli modüllerin eklenerek uyum sağlayabildiği bir araç olarak yapılabilir. Bu araçlar, ayarlanabilir otonomi düzeyleri ve modüler kontrol konsolları ile uzaktan yönetilebilir, zeminle temas ederek ilerleyen yeni nesil insansız araçlar olarak ifade edilir (Demir ve Bozdemir, 2019).

İnsansız kara araçları, savunma sektöründe, özellikle tehlikeli ve erişilmesi zor bölgelerde görev yapma kapasitesi ile öne çıkmaktadır. Bu araçlar, askeri operasyonlar sırasında insan hayatını riske atmadan keşif, gözetleme ve hatta doğrudan çatışma görevlerini üstlenebilir. Gelişmiş sensör paketleri ve otonom navigasyon sistemleri ile donatılmıştır, böylece karmaşık savaş alanı ortamlarında bile etkili bir şekilde manevra yapabilirler. Bu özellikler, onları savaş alanındaki stratejik avantajları artıran kritik varlıklar haline getirir. Askeri kullanım alanları arasında, bomba imha operasyonları öne çıkmaktadır. İnsansız kara araçları patlayıcıları tespit etme ve etkisiz hale getirme görevlerini insan müdahalesine gerek kalmadan yapabilir. Ayrıca, düşman hatlarının derinliklerine sızma ve orada keşif yapma gibi stratejik görevler de insansız kara araçları tarafından yürütülebilmektedir. Bu araçlar, düşman kuvvetlerinin yerini belirleme, hareketlerini izleme ve bu bilgileri gerçek zamanlı olarak komuta merkezlerine iletebilme yeteneğine sahiptir. Bu teknolojik ilerlemeler, insansız kara araçlarını giderek daha vazgeçilmez hale getirmekte, ancak aynı zamanda etik ve yasal düzenlemelere olan ihtiyacı da artırmaktadır. İKA kullanımı, savaş hukuku ve askeri etik konularında yeni tartışmaları beraberinde getirmektedir. Bu araçların operasyonel yetenekleri, insansız sistemlerin askeri disiplinlerdeki rolünü yeniden şekillendirmekte ve savunma stratejilerinde önemli değişikliklere yol açmaktadır (Yoon and Bostelman, 2019).

Askeri alanda İKA'lar, düşman hatlarına sızma, silahlı saldırı, bomba imha, mayın tarama ve izleme gibi görevlerde kullanılır. Sivil alanda ise tarım, yangın söndürme, çevre izleme ve altyapı incelemesi gibi çeşitli işlerde etkin olarak kullanılmaktadır. Özellikle afet yönetimi ve acil durum müdahalelerinde İKA'lar hayati rol oynayabilir (Demir ve Bozdemir, 2017). İnsansız kara araçları ile ilgili zorluklar arasında yüksek maliyetler, teknik sınırlamalar, yasal ve etik konular

yer alır. Ayrıca, güvenlik açısından siber saldırılara karşı korunması gereken hassas sistemler içermektedir. Gelecekte, İKA teknolojisinin daha ileri düzeyde otonomiye ulaşması, maliyetlerin düşürülmesi ve yasal çerçevelerin netleştirilmesi beklenmektedir.

İnsansız kara araçlarının görev ve yetenekleri aşağıda geniş çapta verilmiştir (Aksoy ve Kurnaz, 2009), (Yuqiao, 2009):

- Her türlü hava durumu ve zeminde, gece gündüz aralıksız çalışabilme özelliği
- Su geçirmez yapı ve amfibi operasyonlara uygunluk
- Üstün manevra kabiliyeti, mobilite ve stabilite
- Darbelere karşı yüksek dayanıklılık
- Merdiven çıkabilme yeteneği
- Enkaz gibi engelleri aşabilme
- İnsan tarafından kolayca taşınabilme
- Uzun süreli operasyon yeteneği
- Otonom kontrol ve navigasyon sistemleri
- Modüler donanım entegrasyonu
- Gelişmiş haberleşme ve kontrol sistemi
- Hızlı veri transferi kabiliyeti
- Kullanıcı dostu arayüz ve kısa operatör eğitimi
- Düşük maliyet ve seri üretim imkanı
- Kolay bakım ve idame
- Kolay güncellenebilir yazılım yapısı
- Havadan bırakılabilme
- Bir duvarın üzerinden veya bir araçtan fırlatılabilme
- Düşük tespit edilebilirlik seviyesi
- Hava ve kara saldırılarına karşı koruyucu zırh
- Diğer insanlı ve insansız araçlarla iletişim kurabilme
- Sessiz izleme ve hareket etme yeteneği
- Silah platformu olarak kullanabilme
- Kendi arızalarını tespit edebilme özelliği
- Muharebe alanında ve muharebe öncesi üstünlük sağlaması
- Savaş ortamında daha insani olabilme
- Keşif, gözetleme ve istihbarat toplama
- Anayurt güvenliğine katkı
- Taarruz operasyonlarında aktif rol alabilme
- Mayın temizleme işlemleri
- Bomba imha faaliyetleri

- Sınır devriyeleri ve lojistik destek sağlama
- Tespit edilen hedeflere ateş desteği verme
- Terörle mücadele operasyonları
- Tesis ve bina güvenliğini sağlama
- Uzay araştırmaları ve bilimsel çalışmalarda kullanım
- Yetkili olmayan veya şüpheli personeli tespit edebilme
- Tekrar eden görevleri hızlı ve doğru şekilde yerine getirme
- İletişim rölesi olarak işlev görme
- Konuşma tanıma ve 3D ses algılama yeteneği
- Güvenlik birliklerinin çevreyi ilk gören, ilk anlayan, ilk harekete geçen ve ilk kesin sonuca ulaşan olmalarını sağlama
- Otonom, uzaktan veya araç üzerinden yönetim; otonom yer değiştirme, engel tanıma ve aşma, yol takibi yapabilme

2. İKA TASARIM KATALOGU

İnsansız kara araçları çok fazla mekanik sistemin bir araya gelmesinden oluşmaktadır. Bu mekanik sistemlerin birbirini uyumlu çalışabilmesi için seçimlerinin süzgeçten geçirilmesi büyük önem arz etmektedir. İKA'ların başarısı büyük ölçüde, mekanik sistemlerinin diğer bileşenlerle olan uyumluluğuna bağlıdır. Bu uyumluluk, aracın verimliliğini, işlevselliğini ve görev süresini doğrudan etkiler. İKA'larda mekanik sistem uyumluluğu, aracın hareket kabiliyetini, yük taşıma kapasitesini ve dayanıklılığını belirler.

Tablo 1'de, insansız kara aracı tasarımında belirlenen mekanik sistem yapılarına yönelik farklı varyasyonların çözümlenebileceği genel çözüm çizelgesi yapısı gösterilmektedir. Tasarım katalogunda yer alan 15 parametre şunlardır: Özerk Yapı, Kontrol sistemi, faydalı Yük, Motor, Yönlendirme Sistemi, Süspansiyon Sistemi, Gövde Malzemesi, Enerji Sistemi, Güç Aktarma Sistemi, Fren Sistemi, Isı Yönetim Sistemi, Elektrik Sistemi, Elektronik Üniteler, İntikal Konfigürasyonu, Şasi.

u

TASARIM KATALOGU											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Özerk Yapı	Manuel	Yarı-Otonom	Otonom							
2	Kontrol Sistemi	RF Kumanda	Uzaktan Kumanda Modülü	Uydu							
3	Faydalı Yük	Gözetleme Sistemi	Bomba İmha Sistemi	Taşıyıcı Sistem	Silah Sistemi	Mayın-Engel Temizleme Sistemi					
4	Motor	0–20 kw	20–75 kw	75–300 kw	300+ kw	25–100 Hp	100–400 Hp	400+ Hp	25–100 Hp + 0–20kw	100–400 Hp + 20–75 kw	400+ Hp + 75+ kw
5	Yönlendirme Sistemi	Ackerman	Diferansiyel	4WS	Skid-Steer	Aktif Dönüşlü					
6	Süspansiyon Sistemi	Kauçuk-Elastomerik	Yay ve Amortisör Sistemleri	MacPherson	Çift Salıncaklı	Burulabilen Mil	Katı Aks	Hidropnömatik			
7	Gövde Malzemesi	Polimer Malzemeler	Kompozit Malzemeler	Alüminyum Alaşımlar	Çelik Alaşımlar						
8	Enerji Sistemi	Pil	Batarya	Yakıt Hücresi	Yakıt Tankı						
9	Güç Aktarma Sistemi	Sabit Oranlı Transmisyon	Elektrikli Transmisyon	Değişken Oranlı Transmisyon							
10	Fren Sistemi	Dinamik Frenleme	EBS	ABS	Rejeneratif Frenleme						
11	Isı Yönetim Sistemi	Hava Soğutmalı	Yağ Soğutmalı	Su Soğutmalı							
12	Elektrik Sistemi	Aküsüz	12V-Akü	24V-Akü	28V-Akü						
13	Elektronik Üniteler	Sensörler-Kameralar-İşlemciler-Güç Dağıtım Üniteleri-Kablolar									
14	İntikal Konfigürasyonu	2 Tekerlekli	4 Tekerlekli	6 Tekerlekli	8 Tekerlekli	Paletli					
15	Şasi	2 Tekerlekli Şasi	4 Tekerlekli Şasi	6 Tekerlekli Şasi	8 Tekerlekli Şasi	Paletli Şasi					

Tablo 1. İKA tasarım katalogu

2.1. Gövde Malzemeleri

İnsansız kara araçları, zorlu çevresel şartlar ve operasyonel talepler nedeniyle, dayanıklı ve işlevsel malzemelerle donatılmış olmalıdır. Araçların gövde yapımında kullanılan malzemeler, performans, dayanıklılık, ağırlık ve maliyet gibi çeşitli faktörlere göre seçilir. İKA'ların gövde yapımında sıklıkla tercih edilen dört ana malzeme türü polimer malzemeler, kompozit malzemeler, alüminyum alaşımlar ve çelik alaşımlarıdır. Bu malzemeler, her biri özgün özellikler ve avantajlar sunarak, araçların çeşitli operasyonel gereksinimlerini karşılamak üzere özel olarak seçilir ve kullanılır.

Polimer malzemeler**;** uygun maliyetleri ve yüksek korozyon dirençleri nedeniyle, özellikle gövde kaplamaları ve izolasyon bileşenleri gibi uygulamalarda sıkça kullanılırlar. İnsansız kara araçları için polimer malzemeler seçilirken, malzemenin mekanik dayanıklılığı, hafifliği, işlenebilirliği ve çevresel koşullara dayanıklılığı önemlidir. Polimerler, bu özellikleri sağlamaları nedeniyle tercih edilir. İKA'ların gövdesinde genellikle yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE), polipropilen (PP), ve polivinil klorür (PVC) gibi polimerler kullanılır. Bu malzemelerin darbe direnci ve mukavemeti, araçların zorlu dış koşullarda kullanılabilmesi için idealdir. Araştırmacılar, daha dayanıklı ve daha hafif İKA gövdeleri geliştirmek için nano-polimer kompozitler ve hibrit malzemeler üzerinde çalışmaktadır. Bu malzemeler, geleneksel polimerlerin özelliklerini iyileştirerek daha iyi performans el edilebilir. Polimer malzemelerin çevresel etkileri de göz önünde bulundurulmalıdır. Geri dönüştürülebilir ve çevre dostu polimerlerin kullanımı, sürdürülebilirlik açısından önem taşır (Özdemir, 2020).

Kompozit malzemeler; mukavemet/ağırlık oranları yüksektir. Bu malzemeler, özellikle karbon fiber ve epoksi bazlı kompozitler, yük taşıyan yapısal parçalar ve aerodinamik bileşenler için idealdir. Kompozit malzemeler, farklı malzemelerin birleştirilmesiyle elde edilir ve bu birleşim, malzemenin mekanik, termal ve elektriksel özelliklerini iyileştirebilir. Özellikle, karbon fiber ve epoksi reçine gibi kompozitler, yüksek mukavemet ve düşük ağırlık özellikleri nedeniyle İKA gövdelerinde yaygın olarak kullanılır. İKA'ların gövde yapımında kullanılan kompozit malzemeler, özellikle zorlu çevresel koşullar ve yüksek darbe direnci gerektiren uygulamalarda tercih edilir. Bu malzemeler, aracın ağırlığını azaltırken dayanıklılığını artırır ve bu da aracın enerji verimliliğini ve hareket kabiliyetini iyileştirir. Kompozit malzeme teknolojisindeki yenilikler, daha hafif, daha dayanıklı ve daha etkili malzemelerin geliştirilmesine olanak tanır. Örneğin, nano-teknoloji, kompozit malzemelerin performansını artırarak daha iyi darbe direnci ve yüksek sıcaklıklara dayanıklılık sağlar. Kompozit malzemelerin üretimi

ve atılması sırasında çevresel etkiler de dikkate alınmaktadır. Geri dönüştürülebilir veya biyobazlı kompozitler, çevresel etkiyi azaltma yönünde alternatifler sunacaktır (Bulut, 2014).

Alüminyum alaşımlar; yüksek mukavemet, düşük yoğunluk ve iyi korozyon direnci özellikleri nedeniyle İKA gövdelerinde sıklıkla tercih edilir. Bu malzemeler, araçların daha hafif olmasını sağlarken, performansını artırır ve enerji verimliliğini iyileştirir. Alüminyum alaşımlar, özellikle askeri ve sivil insansız araçlarda kullanılır. Bu alaşımlar, aracın yapısal bütünlüğünü sağlamak ve zorlu operasyonel koşullarda dayanıklılık sunmak için idealdir. Gelişmiş üretim teknikleri, alüminyum alaşımlarının daha da iyileştirilmesine olanak tanır. Örneğin, toz metalurjisi ve 3D baskı, bu alaşımların özelliklerini optimize ederek daha kompleks ve hafif yapılar oluşturulmasına imkan sağlar. Alüminyum alaşımların geri dönüştürülebilirliği, çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli bir avantajdır (Çağan ve arkadaşları, 2017).

Çelik alaşımlar; yüksek mukavemet, iyi sertlik ve mükemmel aşınma direnci özellikleriyle bilinir. Bu özellikler, İKA gövdelerinin zorlu koşullarda bile yüksek performans göstermesini sağlar. Çelik alaşımlar, özellikle askeri zırhlı İKA'larda tercih edilir çünkü bu alaşımlar yüksek darbe ve patlama direnci sağlayarak aracın korunmasına katkıda bulunur. Ayrıca, sivil alanlarda da çelik, yapısal bütünlüğü ve uzun ömür gerektiren durumlar için idealdir. Geliştirilmiş çelik alaşımları, daha hafif ve daha dayanıklı yapılar sağlamak üzere tasarlanmıştır. Bu alaşımlar, termomekanik işleme ve alaşım elementleri eklenmesiyle özellikleri iyileştirilir. Çelik alaşımlarının geri dönüştürülebilirliği, çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli bir avantajdır. Ancak, üretim süreçlerinde yüksek enerji tüketimi ve sera gazı emisyonları çelik kullanımının çevresel etkileri arasındadır (Karaman, 2021).

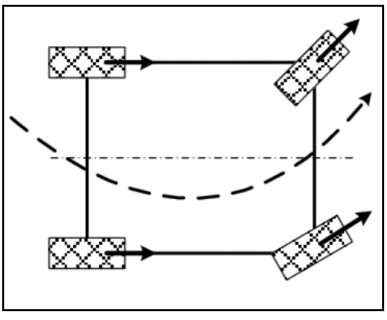
Bu dört malzeme türü, İKA'ların tasarım ve imalatında kritik roller oynar. Her bir malzemenin özgün özellikleri, araçların belirli operasyonel şartlara uygun olarak geliştirilmesini sağlar, böylece araçlar daha uzun ömürlü, güvenilir ve etkili bir şekilde görev yapabilir. Bu malzemelerin seçimi, İKA'ların başarısında büyük bir rol oynar ve mühendislik ekiplerinin dikkate alması gereken önemli bir karar noktasıdır.

2.2. Yönlendirme Sistemi

İnsansız kara araçları genellikle zorlu arazilerde ve karmaşık çevrelerde görev yapmak üzere tasarlanmıştır. Bu araçların etkin bir şekilde navigasyon yapabilmesi ve görevlerini başarıyla yerine getirebilmesi için gelişmiş yönlendirme sistemlerine ihtiyaç duyarlar. İKA'ların yönlendirilmesi, kullanılan sisteme bağlı

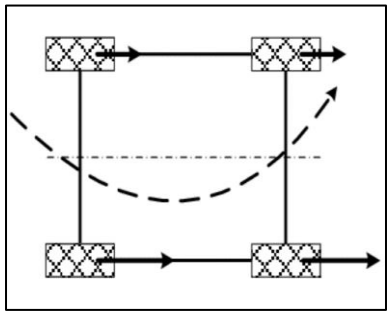
olarak farklı mekanik ve elektronik bileşenlerin koordineli çalışmasını gerektirir. İKA'larda kullanılan yönlendirme sistemleri geniş bir yelpazeye yayılmış olup, her bir sistem aracın manevra kabiliyetini, stabilitesini ve hareket etkinliğini artırmak için özel olarak tasarlanmıştır. Bu sistemler arasında en yaygın olanları Ackerman, diferansiyel, Skid-Steer, aktif dönüşlü ve 4WS yönlendirme sistemleridir. Bu yönlendirme teknikleri, İKA'ların farklı operasyonel gereksinimlerini karşılamak üzere özelleştirilir ve bu araçların karşılaşabileceği çeşitli zorluklara uyum sağlamasına olanak tanır.

Ackerman yönlendirme sistemi; dört ve üzeri tekerlekli araçlarda kullanılan geleneksel bir yönlendirme mekanizmasıdır. Bu sistem, aracın dönüş sırasında iç ve dış tekerleklerin dönüş yarıçaplarını farklılaştırarak daha verimli ve doğru bir yönlendirme sağlar. İnsansız kara araçları üzerinde yapılan çalışmalarda da Ackerman sisteminin avantajlarından yararlanılmaktadır. Ackerman yönlendirme sistemi, tekerlek açılarını ayarlayarak aracın dönüş yarıçapını optimize eder. Bu, özellikle dar alanlarda manevra kabiliyetini artırır ve tekerlek kaymalarını minimize eder (Çetinkaya, 2015). İKA'lar genellikle karmaşık ve dar alanlarda operasyon gerektirdiğinden, Ackerman yönlendirme sistemi bu tür araçlar için idealdir. Sistem, aracın dönüşlerde daha stabil ve kontrollü olmasını sağlar. Ackerman yönlendirme sisteminin elektronik kontrol sistemleriyle entegrasyonu, daha dinamik ve hassas yönlendirme imkanları sunar. Bu entegrasyon, araçların otomatik pilot modlarında ve zorlu arazi şartlarında daha etkili performans sergilemelerine olanak tanır. Etkili bir yönlendirme sistemi olan Ackerman, aracın enerji verimliliğini de artırır. Dönüşler sırasında gereksiz güç kullanımını azaltarak, aracın genel yakıt tüketimini ve enerji harcamalarını düşürür (Wu ve arkadaşları, 2013). Şekil 1'de Ackerman yönlendirme sisteminin çalışma şekli gösterilmiştir.



Şekil 1. Ackerman yönlendirme sistemi (Wu ve arkadaşları, 2013)

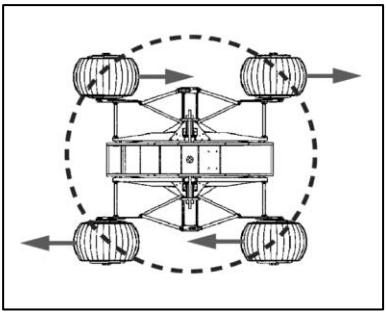
Diferansiyel yönlendirme sistemi; insansız kara araçları için özellikle zorlu arazi şartlarında etkili manevra kabiliyeti sağlayan bir tekniktir. Diferansiyel yönlendirme sistemi, aracın tekerleklerine bağımsız hızlar uygulayarak dönüş yapmasını sağlar. Bu sistem, özellikle dar alanlarda veya zorlu arazilerde aracın daha iyi manevra yapabilmesini ve stabil kalmasını sağlar. Bu yönlendirme sistemi, özellikle zorlu ve engebeli arazilerde kullanılan İKA'lar için idealdir. Sistem, aracın tekerlekler arasında güç dağılımını optimize ederek, aracın arazi üzerinde daha iyi kontrol ve dengeli hareket etmesini sağlar (Jones ve arkadaşları, 1998). Modern İKA'larda diferansiyel yönlendirme sistemleri, gelişmiş algoritmalar ve sensör teknolojileri ile desteklenmektedir. Bu entegrasyon, sistemlerin daha hassas ve etkili çalışmasını sağlar, bu da aracın genel performansını artırır. Diferansiyel yönlendirme sistemi, aracın gereksiz yere güç harcamasını önleyerek enerji verimliliğini artırabilir. Bu sistem, özellikle enerji tasarrufu gerektiren uzun süreli görevlerde İKA'ların daha verimli çalışmasına olanak tanır (Wu ve arkadaşları, 2013). Şekil 2'de Diferansiyel yönlendirme sisteminin çalışma şekli gösterilmiştir.



Şekil 2. Diferansiyel yönlendirme sistemi (Wu ve arkadaşları, 2013)

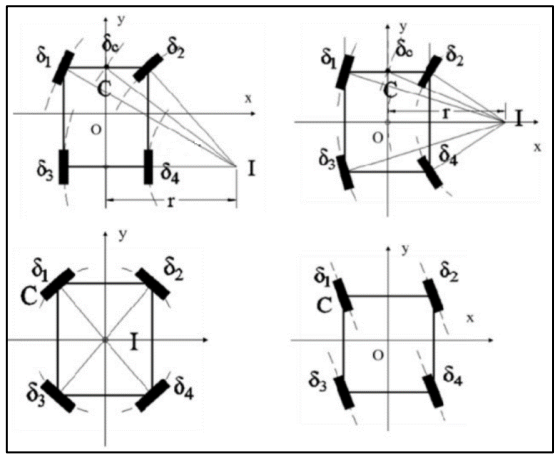
Skid-Steer yönlendirme sistemi; insansız kara araçları için kullanılan etkili bir yönlendirme mekanizmasıdır. Bu sistem, aracın bir tekerlek setini diğer setten farklı hızlarda döndürerek dönüş yapmasını sağlar. Skid-Steer yönlendirme, aracın tekerleklerini karşıt yönlere döndürerek sıfır dönüş yarıçapı sağlar. Bu, özellikle dar alanlarda manevra yapmayı kolaylaştırır ve aracın hızlı bir şekilde yönlendirilmesine olanak tanır (Shamah, 1999). Genellikle zorlu arazi koşullarında ve dar alanlarda çalışan İKA'lar için idealdir. Bu sistem, aracın dengesini koruyarak engebeli yüzeylerde bile stabil bir hareket sağlar. Skid-Steer sistemleri, gelişmiş kontrol sistemleri ve algoritmalar ile entegre edilerek daha verimli hale getirilmiştir. Bu entegrasyon, sistemin daha hassas ve etkili bir şekilde çalışmasını sağlar. Skid-Steer yönlendirme sistemi, aracın gereksiz yere güç harcamasını

önleyerek enerji verimliliğini artırabilir. Bu sistem, enerji tasarrufu sağlayarak uzun süreli operasyonlar için İKA'ların daha verimli çalışmasına katkıda bulunur. Şekil 3'te Skid-Steer yönlendirme sisteminin çalışma şekli gösterilmiştir.



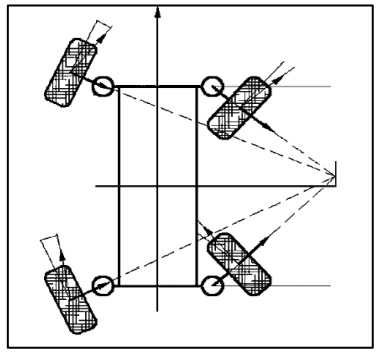
Şekil 3. Skid-Steer yönlendirme sistemi (Shamah, 1999)

Aktif dönüşlü yönlendirme sistemi; insansız kara araçlarında da kullanılan bu sistem, aracın tekerlek açılarını dinamik olarak ayarlayarak, dönüş kabiliyetini ve manevra performansını artırır. Aktif dönüşlü yönlendirme sistemi, her bir tekerleğin bağımsız olarak yönlendirilebildiği aktif dönüşlü tekerlek sistemlerini kullanabilir. Bu, aracın daha küçük dönüş yarıçaplarında manevra yapmasını sağlar ve özellikle dar alanlarda üstün manevra kabiliyeti sağlar. Bu sistem genellikle yüksek manevra kabiliyeti gerektiren askeri ve sivil İKA'larda kullanılır. Aktif dönüşlü sistem, aracın zorlu arazi koşullarında ve engelli alanlarda daha etkili hareket etmesine imkan tanır. Modern aktif dönüşlü sistemler, gelişmiş sensörler ve kontrol algoritmaları ile entegre edilerek, aracın çevresel koşullara daha hızlı ve doğru bir şekilde uyum sağlamasına olanak sağlar. Bu sistemler, genellikle elektronik ve hidrolik bileşenlerle desteklenir. Aktif dönüşlü yönlendirme sistemleri, aracın genel enerji tüketimini optimize ederek enerji verimliliğini artırabilir. Sistem, gereksiz tekerlek sürtünmesini ve enerji kaybını azaltarak daha uzun operasyon süreleri ve düşük bakım maliyetleri sunar (Zhang ve arkadaşları, 2019). Şekil 4'te aktif dönüşlü yönlendirme sisteminin çalışma şekli gösterilmiştir.



Şekil 4. Aktif dönüşlü yönlendirme sistemi

4WS yönlendirme sistemi; insansız kara araçlarında da kullanılan bu sistem hem ön hem de arka tekerleklerin yönlendirilmesini sağlayarak aracın manevra kabiliyetini artırır. 4WS sistemi, aracın hem ön hem de arka tekerleklerinin aktif olarak dönmesini sağlar. Bu, aracın daha küçük dönüş yarıçaplarında manevra yapmasını ve dar alanlarda daha etkin hareket etmesini sağlar. 4WS sistemi, özellikle dar alanlarda ve zorlu arazi koşullarında yüksek manevra kabiliyeti gerektiren İKA'larda kullanılır. Bu sistem, aracın hızlı tepki vermesini ve daha stabil olmasını sağlar. Günümüzde 4WS sistemleri, elektronik kontrol sistemleri ile entegre edilerek daha verimli hale getirilmiştir. Bu sistemler, sensörler ve gelişmiş algoritmalar yardımıyla aracın hareketlerini dinamik olarak ayarlar. 4WS yönlendirme sistemi, aracın enerji tüketimini optimize ederek enerji verimliliğini artırabilir. Sistem, tekerlek sürtünmesini azaltarak ve daha kısa yollardan gitmeyi sağlayarak yakıt tüketimini düşürür (Song ve arkadaşları, 2016). Şekil 5'te 4WS yönlendirme sisteminin çalışma şekli gösterilmiştir.



Şekil 5. 4WS yönlendirme sistemi (Song ve arkadaşları, 2016)

2.3. Süspansiyon Sistemi

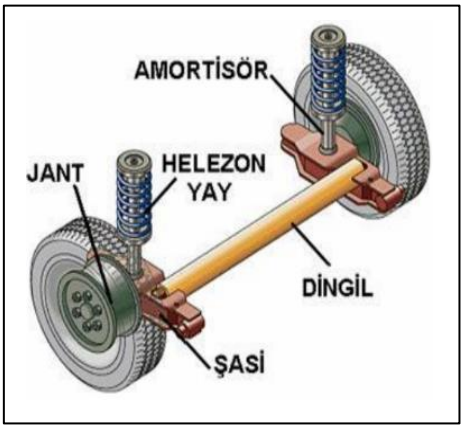
İnsansız kara araçlarının zorlu ve değişken arazi koşullarında kararlı ve etkili bir şekilde hareket edebilmesi için gelişmiş süspansiyon sistemlerine ihtiyaç duyarlar. Süspansiyon sistemleri, aracın yol tutuşunu, konforunu ve genel operasyonel performansını doğrudan etkiler. İKA'larda kullanılan süspansiyon sistemleri, araçların zorlu arazi şartlarına uyum sağlamasına ve çeşitli engelleri aşabilmesine olanak tanırken, aynı zamanda aracın yapısal bütünlüğünü ve sistemlerinin sağlıklı çalışmasını da destekler. Süspansiyon sistemleri seçilirken arazi şartları ile insansız kara aracının bulunduğu sınıf ağırlığı ve intikal konfigürasyon durumu da dahil edilmektedir.

İKA'larda kullanılan ve ileride kullanılacak olan süspansiyon sistemleri arasında Kauçuk-Elastomerik, Yay ve Amortisör Sistemleri, MacPherson, Çift Salıncaklı, Burulabilen Mil, Katı Aks ve Hidropnömatik sistemler yer almaktadır. Her bir sistem, farklı avantajlar sunarak aracın belirli bir kullanım amacına veya operasyonel şartlara en uygun şekilde çalışmasını sağlar. Bu çeşitlilik, İKA'ların görev ve çevresel ihtiyaçlarına göre özelleştirilebilir olmasını sağlar, bu da onları çok yönlü ve uyum sağlayabilir platformlar haline getirir.

Kauçuk-Elastomerik süspansiyon sistemi; hafif insansız kara araçları için basit kauçuk süspansiyon sistemleri, özellikle maliyet etkinliği ve basitlik açısından tercih edilen bir çözümdür. Bu sistemler, araçların hafif yapısını destekleyerek, arazideki performansını ve darbe emilimini artırır. Basit kauçuk-elastomerik süspansiyon sistemi, genellikle kauçuk bloklar veya yastıklar kullanarak aracın şasesi ile tekerlekleri arasında esnek bir bağlantı sağlar. Bu yapı, darbeleri emer ve aracın daha konforlu hareket etmesine olanak tanır. Bu tür süspansiyonlar, özellikle hafif ve kompakt İKA'larda kullanılır. Düşük maliyetli ve basit yapıları, bu tür araçlar için idealdir ve arazideki manevra kabiliyetini artırır. Gelişen malzeme teknolojileri, kauçuk süspansiyon sistemlerinin daha dayanıklı ve etkili olmasını sağlamıştır. Ayrıca, kauçuk malzemenin işlenmesi ve kalitesindeki iyileştirmeler, bu sistemlerin performansını artırmaktadır. Kauçuk süspansiyon sistemleri genellikle yeniden işlenebilir ve çevre dostu malzemelerden üretilir (Khan, 2023).

Yay ve amortisörler sistemleri; insansız kara araçları için kullanılan en yaygın süspansiyon çözümlerinden biridir. Bu sistem, aracın arazi koşullarına uyum sağlamasını, darbeleri etkili bir şekilde emmesini ve genel sürüş konforunu artırmasını sağlar. Yay ve amortisörler sistemi, metal yaylar ve hidrolik amortisörler kullanarak aracın tekerleklerinin yoldan aldığı darbeleri absorbe eder. Bu yapı, aracın daha stabil bir sürüş deneyimi sunmasını sağlar ve arazi şartlarında aracın kontrolünü kolaylaştırır. Hem askeri hem de sivil İKA'larda kullanılır. Özellikle

arazi performansı önemli olan durumlarda, bu sistem aracın yüzeyden aldığı etkileri minimize ederek daha etkili bir hareket kabiliyeti sunar. Modern süspansiyon sistemleri, yay ve amortisörlerin performansını artırmak için gelişmiş malzemeler ve teknolojiler kullanır. Örneğin, ayarlanabilir amortisörler ve elektronik süspansiyon kontrol sistemleri, aracın farklı yüzey ve yük koşullarına göre süspansiyon ayarlarını otomatik olarak değiştirebilir. Yay ve amortisörler sistemi, genellikle metal ve hidrolik sıvılar kullanır. Bu malzemelerin geri dönüşümü ve çevresel etkilerinin yönetimi, sürdürülebilirlik açısından önemlidir. Gelecekteki araştırmalar, daha hafif ve daha verimli süspansiyon sistemlerinin geliştirilmesine odaklanabilir. Ayrıca, süspansiyon sistemlerinin enerji geri kazanımı gibi yeni teknolojilerle entegrasyonu da araştırma konuları arasında olabilir (Gündüz, 2010). Şekil 6'da yay ve amortisör sisteminin yapısı gösterilmiştir.



Şekil 6. Yay ve amortisör sistemi (Gündüz, 2010)

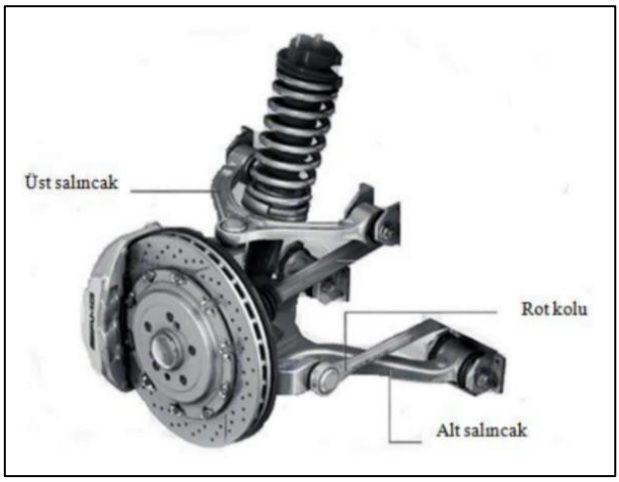
MacPherson süspansiyon sistemi; özellikle otomotiv endüstrisinde yaygın olarak kullanılan ve insansız kara araçları için de uyarlanabilen bir süspansiyon çözümüdür. Hem kompakt yapısı hem de sağladığı stabilite ile dikkat çeker. MacPherson, bir amortisör ve yayın tek bir yapısal birim olarak entegre edildiği bir süspansiyon türüdür. Hem ağırlığı azaltır hem de aracın ön kısmında daha fazla alan sağlar. Sistem, aracın dönüş dinamiklerini ve yere tutunma kabiliyetini iyileştirir, böylece daha stabil bir sürüş sunar. MacPherson, genellikle hafif ve orta büyüklükteki İKA'larda kullanılır. Bu sistem, özellikle düz yüzeyler ve düzenli arazi koşulları altında mükemmel performans gösterir ve aracın yönlendirilmesinde büyük bir hassasiyet sağlar. Gelişmiş malzeme bilimleri ve mühendislik teknikleri sayesinde, MacPherson süspansiyon sistemleri daha hafif ve daha da-

yanıklı malzemelerle üretilmekte, bu da araçların genel verimliliğini artırmaktadır. Bu süspansiyon sisteminin kompakt yapısı, daha az malzeme kullanılmasını ve dolayısıyla atık miktarının azalmasını sağlar. Ayrıca, sistemde kullanılan malzemelerin çoğu geri dönüştürülebilir niteliktedir (Putgül ve Altıparmak, 2016). Şekil 7'de MacPherson süspansiyon sisteminin yapısı gösterilmiştir.



Şekil 7. MacPherson süspansiyon sistemi (Putgül ve Altıparmak, 2016)

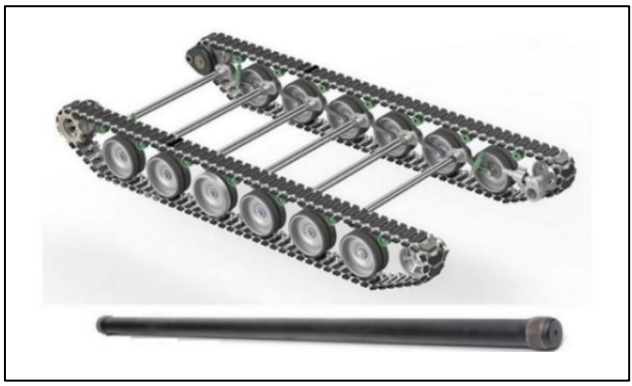
Çift salıncaklı süspansiyon sistemi; aracın tekerlek hareketlerini ve yere basma kuvvetini daha etkin kontrol etmek için tasarlanmıştır. Çift salıncaklı süspansiyon, her bir tekerlek için bağımsız hareket kabiliyeti sunan iki salıncak kolu kullanır. Bu yapı, aracın dengesini artırır ve zorlu arazi koşullarında bile yüksek sürüş konforu ve stabilite sağlar. Bu tür süspansiyonlar, özellikle yüksek performans ve üstün arazi geçiş kabiliyeti gerektiren askeri İKA'larda tercih edilir. Çift salıncaklı süspansiyon sistemleri, gelişmiş malzemeler ve mühendislik çözümleri kullanılarak daha hafif ve daha dayanıklı hale getirilmiştir. Ayrıca, bu sistemler giderek daha fazla elektronik kontrol ve adaptif özelliklerle donatılmaktadır. Çift salıncaklı süspansiyon sistemlerinin gelişimi, malzeme kullanımını ve enerji tüketimini optimize etmeye yardımcı olur. Bu, aracın genel çevresel etkisini azaltır ve daha sürdürülebilir bir kullanım sunar (Putgül ve Altıparmak, 2016). Şekil 8'de çift salıncaklı süspansiyon sisteminin yapısı gösterilmiştir.



Şekil 8. Çift salıncaklı süspansiyon sistemi (Putgül ve Altıparmak, 2016)

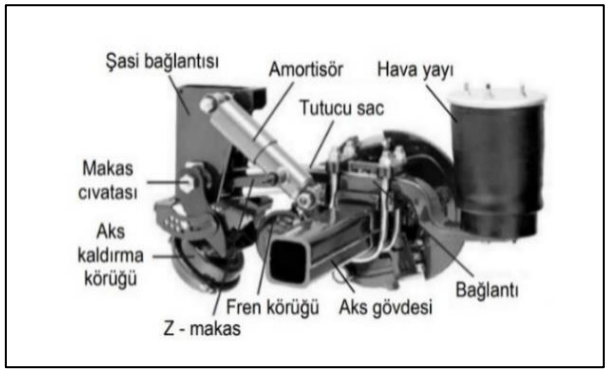
Burulabilen mil süspansiyon sistemi; insansız kara araçları için kullanılan ekonomik bir süspansiyon çözümüdür. Sade yapısı ve düşük maliyeti ile dikkat çeker ve arazide iyi bir performans sunar. Burulabilen mil süspansiyonu, araç şasisine monte edilen ve uçlarında tekerlekler bulunan bir veya birden fazla çelik çubuktan oluşur. Bu çubuklar, aracın yoldaki dalgalanmalarına karşı esnek bir şekilde burularak darbe emilimini sağlar. Bu yapı, aracın stabilitesini artırır ve pürüzlü arazilerde daha konforlu bir sürüş sağlar. Burulabilen mil süspansiyon sistemi, genellikle hafif arazi araçlarında ve bazı askeri İKA'larda kullanılır. Bu sistem, aracın darbe emilimini ve arazi ile olan uyumunu artırarak, aracın zorlu koşullarda etkili bir şekilde çalışmasını sağlar.

Günümüzde burulabilen mil süspansiyon sistemlerinde kullanılan malzemelerin gelişimi ve tasarım optimizasyonları, bu sistemlerin daha dayanıklı ve etkili olmasını sağlamıştır. Ayrıca, sistemlerin daha hafif malzemelerle üretilmesi, araçların genel verimliliğini artırmaktadır. Burulabilen mil süspansiyon sistemi, sade tasarımı ve az sayıda bileşen kullanımı sayesinde çevresel etkiyi azaltabilir. Ayrıca, bu sistemlerin bakımı ve onarımı daha az kaynak gerektirdiğinden dolayı çevresel sürdürülebilirlik açısından avantajlar sunar (Aybar, 2017). Şekil 9'da burulabilen mil süspansiyon sisteminin yapısı gösterilmiştir.



Şekil 9. Burulabilen mil süspansiyon sistemi (Aybar, 2017)

Katı aks süspansiyon sistemi; insansız kara araçları için özellikle zorlu arazi koşullarında kullanılan geleneksel bir süspansiyon çözümüdür. Bu sistem, basit yapısı ve yüksek dayanıklılığı ile bilinir. Katı aks süspansiyonu, aracın her iki tekerleğini birbirine bağlayan tek bir aks kullanır. Bu yapı, yüksek yük kapasitesi ve darbe direnci sağlar, özellikle ağır yük taşıyan veya çok zorlu arazi koşullarında kullanılan İKA'lar için idealdir. Katı aks süspansiyon sistemi, genellikle askeri ve endüstriyel İKA'larda kullanılır. Bu sistem, aracın ağır ekipman taşıması veya engebeli, kayalık arazilerde stabil bir şekilde hareket etmesi gerektiğinde tercih edilir. Günümüzde, katı aks süspansiyon sistemlerinde malzeme ve tasarım iyileştirmeleri yapılmakta, sistem daha hafif ve daha verimli hale getirilmeye çalışılmaktadır. Ayrıca, şok emiciler ve diğer süspansiyon bileşenleri ile entegrasyon, bu sistemlerin konfor ve performansını artırabilir. Katı aks süspansiyon sistemi, az sayıda hareketli parça içerdiğinden bakım gereksinimleri azdır ve bu da uzun vadede çevresel etkiyi azaltabilir. Ayrıca, sistemlerin dayanıklılığı, araç ömrünü uzatır ve atık üretimini minimize eder (Topaç ve arkadaşları, 2019). Şekil 10'da katı aks süspansiyon sisteminin yapısı gösterilmiştir.



Şekil 10. Katı aks süspansiyon sistemi (Topaç ve arkadaşları, 2019)

Hidropnömatik süspansiyon sistemi; insansız kara araçları için kullanılan sofistike bir süspansiyon teknolojisidir. Bu sistem, sıvı ve gazın birleşimiyle çalışan bir mekanizma kullanarak üstün darbe emilimi ve arazi adaptasyonu sağlar. Hidropnömatik süspansiyon, sıvı ve sıkıştırılmış gazı kullanarak çalışır. Bu sistem, tekerleklerin yoldan aldığı darbeleri emerken aynı zamanda aracın yüksekliğini ve sertliğini dinamik olarak ayarlayabilir. Bu özellikler, aracın farklı arazi koşullarına uyum sağlamasını ve optimal sürüş konforu sunmasını sağlar. Hidropnömatik süspansiyon sistemleri, özellikle yüksek mobilite ve adaptasyon kabiliyeti gerektiren askeri İKA'larda kullanılır. Bu sistemler, aracın zorlu arazi şartlarında bile stabilitesini korumasını sağlar ve çeşitli yük ve hız koşullarında etkili performans sergiler. Günümüzde hidropnömatik süspansiyon sistemleri, daha verimli sıvı ve gaz kullanımı, gelişmiş malzemeler ve elektronik kontrol sistemleri ile entegrasyon sayesinde daha da geliştirilmektedir. Bu iyileştirmeler, sistemin daha hafif, daha dayanıklı ve daha etkili olmasını sağlar. Hidropnömatik süspansiyon sistemleri, enerji verimliliği ve malzeme kullanımı açısından optimize edilmiş olup, bakım gereksinimlerinin düşük olması çevresel etkiyi azaltır. Ayrıca, bu sistemler uzun ömürlü ve az atık üretimine sahip olmasıyla bilinir (Kocakulak ve arkadaşları, 2019). Şekil 11'de hidropnömatik süspansiyon sisteminin yapısı gösterilmiştir.



Şekil 11. Hidropnömatik süspansiyon sistemi (Kocakulak ve arkadaşları, 2019)

2.4. İntikal Konfigürasyonu

İnsansız kara araçları, çeşitli görevlerde ve değişken çevresel koşullarda kullanılmak üzere tasarlanmıştır. Bu araçların zorlu arazilerde ve farklı yüzey koşullarında etkin bir şekilde hareket edebilmeleri için çeşitli intikal konfigürasyonlarına sahip olmaları gerekmektedir. İKA'ların intikal konfigürasyonu, aracın hareket kabiliyetini, kararlılığını, hızını ve yük kapasitesini doğrudan etkiler. Bu çeşitlilik, aracın spesifik görev gereksinimlerine uygun olarak özelleştirilmesine olanak tanır.

İnsansız kara araçlarında kullanılan intikal konfigürasyonları arasında 2 tekerlekli, 3 tekerlekli, 4 tekerlekli, 6 tekerlekli, 8 tekerlekli ve paletli sistemler bulunmaktadır. Her bir konfigürasyon, belirli avantajlar sunarak aracın belirli bir kullanım amacına hizmet eder. 2 ve 3 tekerlekli konfigürasyonlar genellikle daha hafif, kompakt ve manevra kabiliyeti yüksek araçlar için tercih edilirken, 4 ve daha fazla tekerleğe sahip konfigürasyonlar daha yüksek yük kapasitesi ve arazi adaptasyonu sağlar. Paletli sistemler ise özellikle engebeli ve zorlu arazilerde üstün çekiş gücü ve kararlılık sunarak, aracın zeminle maksimum temasını sağlar.

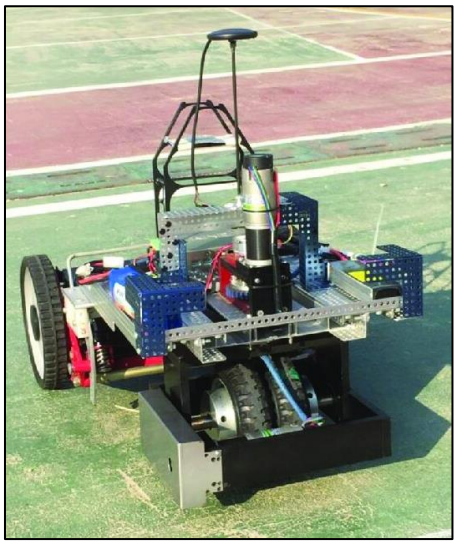
2 tekerlekli intikal konfigürasyonu; özellikle kompakt ve manevra kabiliyeti yüksek araçlar geliştirmede tercih edilen bir konfigürasyondur. Genellikle hafif ve hızlı hareket etmesi gereken durumlar için uygun olan İKA'lar üzerinde kullanılır. 2 tekerlekli İKA'lar, genellikle dinamik denge mekanizmaları ile donatılır. Bu araçlar, yüksek manevra kabiliyeti ve hızlı dönüş yapabilme özellikleri ile bilinir. Çoğunlukla hafif ve minimal tasarım, bu araçların dar alanlarda etkili bir

şekilde hareket etmesini sağlar. 2 tekerlekli yapıya sahip İKA'lar, genellikle keşif, gözetleme ve bazı hız gerektiren operasyonlarda kullanılır. Bu yapı, arazideki engellerin etrafında hızlıca manevra yapma yeteneği sunar ve çoğunlukla iç mekanlarda veya düzenli yüzeylerde etkilidir. 2 tekerlekli İKA'lar, genellikle gelişmiş dengeleme algoritmaları ve sensör teknolojileri ile donatılmıştır. Bu teknolojiler, aracın kararlılığını ve operasyonel etkinliğini artırır. Ayrıca, bu araçlar hafif malzemeler kullanarak enerji verimliliğini maksimize eder. 2 tekerlekli yapı, malzeme kullanımını ve üretim sırasındaki atık miktarını azaltır. Ayrıca, enerji verimliliği ve azaltılmış karbon ayak izi, bu yapıların çevresel sürdürülebilirlik açısından tercih edilmesine olanak tanır (Demir ve Bozdemir, 2017). Şekil 12'de 2 tekerlekli bir İKA örneği gösterilmiştir.



Şekil 12. İki tekerlekli bir insansız kara aracı (URL-1)

3 tekerlekli intikal konfigürasyonu; özellikle kompakt tasarım ve manevra kabiliyeti gerektiren durumlar için idealdir. Stabilite ve esneklik arasında bir denge sunar. 3 tekerlekli İKA'lar, genellikle iki tekerleği önünde ve bir tekerleği arkasında olacak şekilde tasarlanır. Bu düzen, aracın dönüş kabiliyetini artırır ve dar alanlarda etkili manevra yapabilmesini sağlar. Ayrıca, 3 tekerlekli yapı, aracın ağırlığını azaltır ve daha az enerji tüketimi ile daha yüksek hızlara ulaşmasına olanak tanır. 3 tekerlekli yapı, genellikle hafif İKA'lar için tercih edilir ve sıklıkla keşif, gözetleme ve hızlı müdahale görevlerinde kullanılır. Modern 3 tekerlekli İKA'lar, gelişmiş navigasyon sistemleri, otomatik dengeleme mekanizmaları ve hafif malzemelerle donatılmıştır. Bu teknolojiler, aracın operasyonel etkinliğini ve çevikliğini artırır. Malzeme kullanımını azaltarak ve daha hafif bir araç tasarlanarak enerji verimliliğini artırıp daha uzun mesafeleri daha az enerji ile kat etmeyi sağlar (Sun ve Liang, 2022). Şekil 13'te 3 tekerlekli bir İKA örneği gösterilmiştir.



Şekil 13. Üç tekerlekli bir insansız kara aracı (Sun ve Liang, 2022)

4 tekerlekli intikal konfigürasyonu; insansız kara araçları için kullanılan en yaygın intikal konfigürasyonlarından biridir. Bu yapı, genel stabilite, yük taşıma kapasitesi ve arazi adaptasyonu açısından tercih edilir. 4 tekerlekli İKA'lar, dört tekerleğiyle yüksek stabilite ve dengeli bir sürüş sunar. Aracın yüksek yük kapasitelerini taşımasına ve daha zorlu arazi şartlarında etkili bir şekilde manevra yapmasına olanak tanır. Bu yapı tipi hem askeri hem de sivil İKA'larda geniş bir kullanım alanına sahiptir. Özellikle arazi koşullarında yüksek performans gerektiren görevlerde ve zorlu engellerin üstesinden gelmede 4 tekerlekli İKA'lar tercih edilir. Modern 4 tekerlekli İKA'lar, gelişmiş süspansiyon sistemleri, daha güçlü motorlar ve geliştirilmiş navigasyon sistemleri ile donatılmıştır. Bu teknolojik gelişmeler, aracın performansını ve arazi adaptasyonunu önemli ölçüde artırır. 4 tekerlekli yapı, genellikle enerji verimliliği ve operasyonel etkinlik açısından optimize edilmiştir. Ayrıca, malzeme seçimi ve üretim teknikleri, çevresel etkileri azaltacak şekilde tasarlanabilir (Demir, 2017). Şekil 14'te 4 tekerlekli bir İKA örneği gösterilmiştir.



Şekil 14. Dört tekerlekli bir insansız kara aracı (URL-2)

6 tekerlekli intikal konfigürasyonu; daha büyük yük taşıma kapasitesine sahip bir konfigürasyondur. Bu yapı, özellikle zorlu arazi koşullarında ve ağır yük taşıma gereksinimlerinde tercih edilir. 6 tekerlekli İKA'lar, üç çift tekerlek ile donatılmıştır ve bu sayede yüksek taşıma kapasitesi ve üstün arazi geçiş kabiliyeti sunar. Bu yapı, aracın daha büyük ve ağır yükleri taşıyabilmesini sağlar ve zorlu arazi koşullarında daha fazla stabilite ve çekiş gücü sunar. 6 tekerlekli yapı, genellikle askeri amaçlar ve ağır sanayi uygulamalarında kullanılır. Bu araçlar, keşif, lojistik destek ve ağır malzeme taşıma gibi görevlerde etkili bir şekilde kullanılır. Modern 6 tekerlekli İKA'lar, gelişmiş süspansiyon sistemleri, yüksek kapasiteli motorlar ve geliştirilmiş kontrol sistemleri ile donatılmıştır. 6 tekerlekli yapılar, genellikle daha büyük ve daha ağır oldukları için enerji tüketimi ve çevresel ayak izi konularında optimizasyonlar gerektirir. Malzeme seçimi ve üretim süreçleri, çevresel etkileri minimize etmek için dikkatle planlanmalıdır (Demir ve Bozdemir, 2019). Şekil 15'te 6 tekerlekli bir İKA örneği gösterilmiştir.



Şekil 15. Altı tekerlekli bir insansız kara aracı (URL-3)

8 tekerlekli intikal konfigürasyonu; yüksek taşıma kapasitesi ve üstün arazi geçiş kabiliyeti gerektiren durumlarda tercih edilen bir konfigürasyondur. Bu yapı, ağır yüklerin taşınması ve zorlu arazi koşullarında istikrarlı bir performans sağlamak için idealdir. 8 tekerlekli İKA'lar, dört çift tekerlek kullanarak yüksek stabilite ve dengeli bir sürüş sunar. Bu yapı, aracın büyük yük kapasitelerini taşımasına olanak tanır ve zorlu arazi koşullarında dahi yüksek manevra kabiliyeti sağlar. 8 tekerlekli yapı, özellikle askeri ve arazi araştırma görevlerinde kullanılır. Bu araçlar, zorlu arazilerde yüksek performans ve güvenilirlik gerektiren görevlerde etkilidir.

Modern 8 tekerlekli İKA'lar, gelişmiş süspansiyon sistemleri, güçlü motorlar ve geliştirilmiş kontrol sistemleri ile donatılmıştır. Bu teknolojik gelişmeler, aracın hem performansını artırır hem de operatörler için daha fazla kontrol ve esneklik sağlar. 8 tekerlekli yapılar, malzeme kullanımı ve enerji tüketimi açısından optimizasyonlar gerektirir. Malzeme seçimi ve üretim süreçleri, çevresel etkileri minimize etmek için dikkatle planlanmalıdır (Demir, 2017). Şekil 16'da 8 tekerlekli bir İKA örneği gösterilmiştir.



Şekil 16. Sekiz tekerlekli bir insansız kara aracı (URL-4)

Paletli intikal konfigürasyonu; zorlu arazi koşullarında tercih edilen bir intikal konfigürasyonudur. Bu yapı, aracın çeşitli zeminlerde üstün hareket kabiliyeti ve dengesini sağlamak için tasarlanmıştır. Paletli yapı, geniş bir temas yüzeyi sunarak, aracın zemin üzerindeki basıncını düşürür ve böylece çamur, kum, kar gibi yumuşak veya kaygan zeminlerde bile yüksek hareket kabiliyeti sağlar. Ayrıca, bu yapı aracın daha iyi çekiş gücü ve stabilite kazanmasına olanak tanır. Paletli yapı, özellikle askeri İKA'lar için tercih edilir çünkü bu yapı, aracın patlayıcı cihazlara karşı dayanıklılığını artırır ve zorlu arazi koşullarında güvenilir hareket edebilmesini sağlar. Ayrıca, arkeolojik keşifler ve çevresel izleme gibi sivil uygulamalarda da kullanılır. Modern paletli İKA'lar, gelişmiş malzemeler ve süspansiyon sistemleri ile donatılmıştır. Bu sistemler, aracın zeminle olan etkileşimini optimize ederek, daha yüksek hızlarda ve daha uzun mesafelerde etkin bir şekilde çalışmasını sağlar. Paletli araçlar, genellikle ağır oldukları için yüksek yakıt tüketimi ve büyük bir karbon ayak izine sahip olabilir. Ancak, yenilikçi tasarım ve malzeme kullanımı ile bu etkiler minimize edilebilir (Demir ve Bozdemir, 2017). Şekil 17'de paletli bir İKA örneği gösterilmiştir.



Şekil 17. Paletli bir insansız kara aracı (URL-5)

2.5. Motor

İnsansız kara araçları çeşitli görevlerde ve arazi koşullarında etkili bir şekilde çalışabilmeleri için farklı motor tipleriyle donatılmıştır. Bu motor tipleri, aracın enerji verimliliği, çevresel etkileri, güç üretimi ve operasyonel sürekliliği gibi önemli faktörleri doğrudan etkiler. Günümüzde İKA'larda üç ana motor tipi kullanılmaktadır: elektrikli, dizel ve hibrit motorlar. Her bir motor tipi, belirli avantajlar sağlayarak aracın belirli kullanım amaçlarına hizmet eder ve bu, aracın tasarımı ve kullanım alanı üzerinde belirleyici bir rol oynar.

Elektrikli motorlar; sessiz çalışma, yüksek enerji verimliliği özellikleriyle öne çıkar. Özellikle kentsel alanlarda veya gürültünün bir problem oluşturduğu hassas görevlerde tercih edilirler. Elektrikli motorlar, içten yanmalı motorlara kıyasla daha az hareketli parçaya sahiptir, bu da onları daha az bakım gerektiren ve daha uzun ömürlü hale getirir. Ayrıca, anında tork sağlama kapasitesine sahiptir, bu da İKA'ların hızlı ve hassas hareket kabiliyetini artırır. Elektrikli motorlar, özellikle keşif, gözetleme ve çevresel izleme gibi görevlerde kullanılan İKA'lar için idealdir. Bu motorlar, sessiz çalışma özellikleri sayesinde gizli operasyonlarda kullanıma uygunluğu yüksektir. Günümüzde elektrikli motor teknolojisi, daha yüksek enerji yoğunluğuna sahip bataryalar ve daha verimli motor tasarımları ile sürekli gelişmektedir. Bu gelişmeler, İKA'ların daha uzun menzillere ulaşmasını ve daha zorlu görevleri yerine getirmesini sağlar. Elektrikli motorlar, emisyon üretmezler, bu da onları çevre açısından çok daha uygun hale getirir. Ayrıca, yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen elektrikle çalıştırılabilirler (Kıvanç, 2020).

Dizel Motorlar; özellikle güç, verimlilik ve dayanıklılık gerektiren insansız kara araçları için kullanılan yaygın bir motor tipidir. Zorlu arazi koşullarında ve ağır yük taşıma görevlerinde kullanılmak üzere idealdir. Dizel motorlar, robust

yapıları ve yüksek güvenilirlikleri sayesinde, özellikle uzun süreli ve talepkâr görevler için uygun bir seçenektir. Dizel motorlar, yüksek tork üretme kapasitesi ve yakıt verimliliği ile bilinir. Bu motorlar, ağır yükleri taşıyabilme ve uzun süreli operasyonlar için uygun olduğundan, özellikle askeri ve endüstriyel İKA'lar için tercih edilir. Dizel motorlar, genellikle zorlu arazi koşullarında çalışan ve ağır ekipman taşıması gereken İKA'larda kullanılır. Bu motorlar, sağlamlık ve uzun ömür gerektiren uygulamalarda öne çıkar. Modern dizel motor teknolojisi, emisyonları azaltmak ve verimliliği artırmak için sürekli olarak geliştirilmektedir. Gelişmiş yakıt enjeksiyon sistemleri ve turboşarj teknolojileri, bu motorların daha çevreci ve güçlü olmasını sağlar. Dizel motorlar, karbon emisyonları ve yüksek nitrojen oksit seviyeleri nedeniyle çevresel endişelere yol açabilir. Ancak, modern dizel teknolojileri ve daha temiz yakıt kullanımı, bu etkileri azaltmaktadır (Yılmaz, 2024).

Hibrit motorlar; insansız kara araçları için giderek daha popüler bir motor tipi haline gelmektedir. Elektrikli ve dizel motorların kombinasyonunu kullanarak hem enerji verimliliğini hem de performansı optimize eder. Bu motorlar, dizel motorun güç ve menzil avantajlarını, elektrikli motorun sessiz ve verimli çalışması ile birleştirir. Hibrit motorlar, düşük hızlarda veya düşük yük koşullarında elektrik motorunun verimliliğini ve yüksek hızlarda içten yanmalı motorun gücünü kullanarak yakıt tüketimini ve emisyonları azaltır. Hibrit motorlar, genellikle çevresel etkiyi azaltmak ve operasyonel maliyetleri düşürmek isteyen askeri İKA uygulamalarında kullanılır. Bu motorlar, özellikle uzun süreli operasyonlar ve değişken yük koşulları için uygundur. Modern hibrit motor teknolojisi, daha etkili enerji yönetim sistemleri ve gelişmiş batarya teknolojileri ile sürekli olarak geliştirilmektedir. Bu gelişmeler, araçların daha uzun menzillere ulaşmasını ve daha zorlu görevleri yerine getirmesini sağlar. Hibrit motorlar, içten yanmalı motorlara göre genellikle daha düşük karbon emisyonları üretir. Ayrıca, yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen elektrikle çalıştırılabilirler (Erçin, 2020).

2.5.1. Motor Hesaplamaları

Elektrikli Motorlar

Elektrikli motorların güç ve verim hesaplamaları, motorun performansını değerlendirmek için kullanılan önemli parametrelerdir. İnsansız kara araçları gibi uygulamalarda, bu hesaplamalar motor seçiminde ve enerji yönetim stratejilerinin belirlenmesinde kritik rol oynar. İşte bu hesaplamaları yaparken kullanılabilecek temel formüller (Kıvanç, 2020):

1. ***Motor Gücü Hesaplama***

Elektrik motorunun gücü, genellikle watt (W) cinsinden ifade edilir ve hesaplaması Eşitlik 1'de gösterilmiştir. (P = Güç (watt), V = Gerilim (volt), I = Akım (amper)).

$$P = V \text{ x } I \quad (1)$$

Motorun verimliliği biliniyorsa, çıkış gücü hesaplaması Eşitlik 2'de gösterilmiştir. (η = Motorun verimliliği (yüzde olarak 0 ile 1 arasında bir değer), P_{in} = Girdi gücü (watt), P_{out} = Çıktı gücü (watt)).

$$P_{out} = \eta \text{ x } P_{in} \quad (2)$$

2. ***Verim Hesaplama***

Motor verimliliği, girdi gücüne göre motor tarafından kullanılabilir işe dönüştürülen enerji yüzdesini ifade eder ve hesaplaması Eşitlik 3'te gösterilmiştir:

$$\eta = (P_{out}/P_{in}) \text{ x } 100\% \quad (3)$$

3. ***Tork Hesaplama***

Motor torku, motorun döndürme kuvvetini ifade eder ve genellikle Newton metre (Nm) cinsinden hesaplanır. Tork (τ), güç (P) ve açısal hız (ω) arasındaki ilişki ile hesaplaması Eşitlik 4'te gösterilmiştir.

$$\tau = P/\omega \quad (4)$$

4. ***Açısal Hız Hesaplama***

Açısal hız, motor milinin ne kadar hızlı döndüğünü ifade eder ve hesaplaması Eşitlik 5'te gösterilmiştir. (ω = Açısal hız (rad/s), n = Milin dönme hızı (devir/dakika)).

$$\omega = (2\pi \text{ x } n)/60 \quad (5)$$

Dizel Motorlar

Dizel motorların güç ve verimlilik hesaplamaları, motorun performansını anlamak ve optimize etmek için önemlidir. İnsansız kara araçlarında kullanılan dizel motorlar için bu hesaplamalar, genellikle aşağıdaki formüller kullanılarak yapılır (Yılmaz, 2024).

1. ***Motor Gücü Hesaplama***

Dizel motorların gücü genellikle beygir gücü (hp) veya kilowatt (kW) cinsinden ifade edilir. Motor gücünü hesaplamak açısal hız ile momentin çarpımı efektif gücü verir (Eşitlik 6). (N_e = Efektif Güç (kW), M_e = Tork (Nm), ω = Açısal hız (rad/s), n = Milin dönme hızı (devir/dakika)).

$$N_e = \omega \times M_e = {}^{(M_e \times n)}/_{9550} \quad (6)$$

2. ***Tork Hesaplama***

Motor torku genellikle motor karakteristik eğrilerinden veya test verilerinden elde edilir. Teorik bir hesaplama yapmak gerekirse, güç ve açısal hız bilgisi ile tork hesaplanabilir (Eşitlik 7).

$$M_e = {}^{N_e}/_{\omega} = {}^{N_e \times 9550}/_{n} \quad (7)$$

3. ***Verim Hesaplama***

Dizel motor verimliliği, motorun termik verimliliği ile yakından ilgilidir ve genellikle yakıt tüketimi ile ölçülür. Verimlilik hesaplaması Eşitlik 8'de gösterilmiştir. (η = Efektif verim (%), P_e = Efektif motor gücü (kW), B = Yakıt tüketimi (kg/h), H_u = Yakıtın alt ısıl değeri (kJ/kg)).

$$\eta = {}^{P_e \times 3600}/_{B \times H_u} \quad (8)$$

4. *Özgül Yakıt Tüketimi*

Motorun verimliliğini değerlendirmede kullanılan önemli bir ölçüttür. Motorun ürettiği güç başına tükettiği yakıt miktarını gösterir. Bu değer, motorun ne kadar ekonomik çalıştığını gösterir; düşük SFC değerleri daha yüksek verimlilik anlamına gelir. Hesaplaması Eşitlik 9'da gösterilmiştir. (b_e = Özgül yakıt tüketimi (g/kWh), B = Yakıt tüketimi (kg/h), P_e = Efektif motor gücü (kW)).

$$b_e = {}^{B \times 3600}/_{P_e} \quad (9)$$

Hibrit Motorlar

Hibrit motorun toplam gücü, torku ve verimi içten yanmalı motor ve elektrik motorunun toplam hesaplamaları ile bulunur.

1. ***Motor Gücü Hesaplama***

Hibrit motorun toplam gücü, içten yanmalı motorun ve elektrik motorunun güçlerinin toplamıdır (Eşitlik 10). (P_{TOP} = Toplam motor gücü, P_{ICM} = İçten yanmalı motor gücü, P_{EM} = Elektrik motor gücü).

$$P_{TOP} = P_{ICM} + P_{EM} \quad (10)$$

2. <u>Tork Hesaplama</u>

Hibrit motorun toplam torku, içten yanmalı motorun ve elektrik motorunun torklarının toplamıdır (Eşitlik 11). (τ_{TOP} = Toplam tork, τ_{ICM} = İçten yanmalı motor tork, τ_{EM} = Elektrik motor tork).

$$\tau_{TOP} = \tau_{ICM} + \tau_{EM} \quad (11)$$

3. <u>Verim Hesaplama</u>

Hibrit motorun toplam verimi, içten yanmalı motorun ve elektrik motorunun verimlerinin toplamıdır (Eşitlik 12). (η_{TOP} = Toplam verim, η_{ICM} = İçten yanmalı motor verim, η_{EM} = Elektrik motor verim).

$$\eta_{TOP} = \eta_{ICM} + \eta_{EM} \quad (12)$$

3. SONUÇ VE TARTIŞMA

İnsansız kara araçlarının tasarımında kullanılan tasarım katalogu, bu araçların mekanik sistem yapılarına ilişkin farklı varyasyonların çözümlenebilmesi için kapsamlı bir rehber sunmaktadır. Bu yapı, tasarım sürecinde karar vericilere esneklik sağlayarak, farklı görev senaryoları ve ihtiyaçlara uygun özgün tasarımlar geliştirilmesine olanak tanımaktadır.

Tasarım katalogu, insansız kara araçlarının teknik özelliklerini şekillendiren 15 ana parametreyi kapsamaktadır. Özerk yapı, kontrol sistemi, faydalı yük, motor, yönlendirme sistemi ve süspansiyon sistemi gibi parametreler, aracın performansını ve görev kabiliyetini doğrudan etkileyen kritik unsurlardır. Ayrıca, gövde malzemesi, enerji sistemi, güç aktarma sistemi, fren sistemi, ısı yönetim sistemi, elektrik sistemi ve elektronik üniteler gibi bileşenler, aracın dayanıklılığı ve verimliliği açısından önemli rol oynamaktadır. İntikal konfigürasyonu ve şasi tasarımı ise aracın hareket kabiliyeti ve genel yapısal bütünlüğünü belirlemektedir.

Sonuç olarak, insansız kara araçları için hazırlanan bu tasarım katalogu hem mühendislik hem de uygulama alanında geniş bir çözüm yelpazesi sunmaktadır. Genel çözüm çizelgesi yapısı, tasarım sürecinin sistematik bir şekilde ilerlemesini sağlamakta ve alternatiflerin karşılaştırmalı analizine imkan tanımaktadır. Bu yaklaşım, insansız kara araçlarının görev ihtiyaçlarına uygun, optimize edilmiş

ve veriye dayalı tasarım kararları alınmasını mümkün kılmaktadır. Tasarım katalogundaki değişkenlerin sayısının artırılması, insansız kara aracının sistematik tasarımında oluşturulabilecek alternatiflerin sayısını da artıracaktır.

İnsansız kara araçları için hazırlanan tasarım katalogu, yalnızca alternatif tasarım çözümleri üretmekle kalmayıp, aynı zamanda yapay zeka uygulamaları için bir veri seti olarak da kullanılabilir. Katalogda yer alan 15 temel parametre, araçların özerk yapıdan motor türüne, yönlendirme sisteminden enerji sistemine kadar geniş bir yelpazede teknik özelliklerini kapsamaktadır. Genel çözüm çizelgesi yapısı, bu parametrelerin sistematik bir şekilde sınıflandırılmasını sağlayarak, yapay zekanın öğrenme süreci için değerli bir veri kaynağı oluşturur. Bu veri seti, yapay zekanın insansız kara araçları için daha hızlı ve optimize edilmiş tasarım önerileri geliştirmesine imkan tanımaktadır.

KAYNAKLAR

Aksoy, R. ve Kurnaz, S. (2009). İnsansız kara araçları ve muharebe gereksinimleri, *Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi*, 4(1), 1-10.

Aybar, U. (2017). *Paletli zırhlı araçlarda titreşimin sistem mühendisliği yaklaşımı ile rafine edilmesi*. Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.

Bulut, M. (2014). *Türkiye'de kompozit malzeme üretimi ve kompozit malzeme sektörünün genel değerlendirilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Çağan, S. Ç., Uğurlu, M., Buldum, B. B. ve Sevim, İ. (2017). *Alüminyum ve alaşımlarının asker araçlarda kullanımı*. II. Uluslararası Savunma Sanayi Sempozyumu, 6-8 Nisan, Kırıkkale, 402-406.

Çetinkaya, S. (2015). *Taşıt mekaniği*. İstanbul: Nobel Yayın Dağıtım. 101-104, 302-310.

Demir, C. (2017). *İnsansız kara araçlarının hareket sistemlerinin kavramsal tasarımı*, Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırıkkale.

Demir, C. ve Bozdemir, M. (2017). *İnsansız araçlarda teknolojik gelişmelerin incelenmesi*, Uluslararası Taşköprü Pompeiopolis Bilim Kültür Sanat Araştırmaları Sempozyumu, 10-12 Nisan, Kastamonu, 633-647.

Demir, C. ve Bozdemir, M. (2017). *İnsansız kara araçlarında tekerlek ve palet tahrik sistemlerinin incelenmesi*. II. Uluslararası Savunma Sanayi Sempozyumu, 6-8 Nisan, Kırıkkale, 378-387.

Demir, C. ve Bozdemir, M. (2019). İnsansız kara aracı tasarımında ağırlık oranı metodu kullanımı. *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 5(1), 32-45.

Erçin, M. E. 2020 *Elektrikli ve hibrit araçlar için motor sürücü invertörü geliştirilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.

Gündüz, S. (2010). *Taşıtlarda aktif süspansiyon sistemi kontrolü*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

İnternet: Unmanned Ground Vehicles - UGV. URL-1: https://ciedsystems.com.au/unmanned-ground-vehicles-ugv/, Son Erişim Tarihi: 19.04.2024.

İnternet: ALKAR R4. URL-2: https://www.xn--savunmagnl-hebca30c.com/2021/07/10/turkiyenin-insansiz-kara-araclari/, Son Erişim Tarihi: 19.04.2024.

İnternet: BOĞAÇ. URL-3: https://www.elektrolanddefence.com/bogac.html, Son Erişim Tarihi: 19.04.2024.

İnternet: KAPGAN. URL-4: https://www.havelsan.com.tr/sektorler/egitim-ve-simulasyon/robotik-ve-otonom-sistemler/kapgan, Son Erişim Tarihi: 19.04.2024.

İnternet: ALPAR. URL-5: https://defense.otokar.com.tr/insansiz-robotik-arac/alpar, Son Erişim Tarihi: 19.04.2024.

Jones, J. L., Flynn, A., M. and Seiger, B. (1998). *Mobile robots ınspiration to implementation*. Massachusetts, ABD: AK Peters, 486.

Karaman, İ. (2021). *Zırh Çeliklerinde Kaynaklı İmalatta Tahribatsız Muayenenin Önemi*. KEMM (Kaynak Eğitim ve Muayene Merkezi) XII. Kaynak Kongresi, 9-11 Ekim, 2021, 105-112.

Khan, Z. (2023). *Unobtrusive ımplementation of wireless electronics into clothing*. Tampere, Hollanda: Tampere University Press, 150-155.

Kıvanç, Ö. C. (2020). Bir İnsansız kara aracı için yüksek verimli fırçasız doğru akım motoru tasarımı. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 24(2), 494-501.

Kocakulak, T., Çokgünlü, S. A. ve Konukseven, E. İ. (2019). *6x6 taktik tekerlekli askeri kara platformu üzerinde kullanılacak hidropnömatik süspansiyon sisteminin modellenmesi ve sistem elemanlarının sönümlemeye etkisinin incelenmesi*. In International symposium on automotive science and technology, 5-6 Eylül 2019, Ankara, 99-110.

Özdemir, A. O. (2020). *Otomotiv sektöründe kullanılan polimer kompozitlerin şekillendirme sınır diyagramlarının belirlenmesi*. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Putgül, Y. ve Altıparmak, D. (2016). Taşıt süspansiyon sistemi çeşitleri ve ön düzen geometrisine etkileri. *Politeknik Dergisi*, 19(2), 195-202.

Shamah, B. (1999). *Experimental comparison of skid steering vs. explicit steering for a wheeled mobile robot*. Yüksek Lisans Tezi, The Robotics Institute of Carnegie Mellon University, Pittsburgh.

Song, S., Qu, J., Li, Y., Zhou, W. and Guo, K. (2016). Fuzzy control method for a steering system consisting of a four-wheel individual steering and four-wheel individual drive electric chassis. *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, 31(6), 2941-2948.

Sun, Y. P. and Liang, Y. C. (2022). Vector field path-following control for a small unmanned ground vehicle with Kalman filter estimation. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 236(14), 1885-1899.

Topaç, M. M., Özmen, B., Deryal, U. ve Selbes, O. (2019). Özel tip bir yarı römork için bağımsız süspansiyon sistemi tasarımı: Kavramsal tasarım çalışmaları. *Politeknik Dergisi*, 22(1), 95-102.

Wu, X., Xu, M. and Wang, L. (2013). Differential speed steering control for four-wheel independent driving electric vehicle, *In 2013 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 1-6.

Yılmaz, M. S. (2024). *Dizel motora izopropanol ilavesinin performans ve çevre kirliliğine etkisi*, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Karabük.

Yoon, S. and Bostelman, R. (2019). Analysis of automatic through autonomous-unmanned ground vehicles (A-UGVs) towards performance standards. *In 2019 IEEE International Symposium on Robotic and Sensors Environments*, 1-7.

Yuqiao, Z. (2009). *AM 17 field ruggedized UGV*. Yüksek Lisans Tezi, National University of Singapore, Singapore.

Zhang, Q., Karkee, M. and Tabb, A. (2019). The use of agricultural robots in orchard management. *In Robotics and automation for improving agriculture*, 87-214.

BÖLÜM 44

Yer Fıstığının Biyoaktif Bileşenleri

Fatma Hepsağ [1] ***& Sevde Nur Tanç*** [2]

[1] Doç. Dr, Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Kadirli Uygulamalı Bilimler Fakültesi, Gıda Teknolojisi Bölümü, Kadirli 80750 Osmaniye, Türkiye. ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-3688-4106
[2] Yüksek Lisans Öğrencisi, Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Kadirli Uygulamalı Bilimler Fakültesi, Gıda Teknolojisi Bölümü, Kadirli 80750 Osmaniye, Türkiye. ORCID ID: https://orcid.org/0009-0009-0138-2542

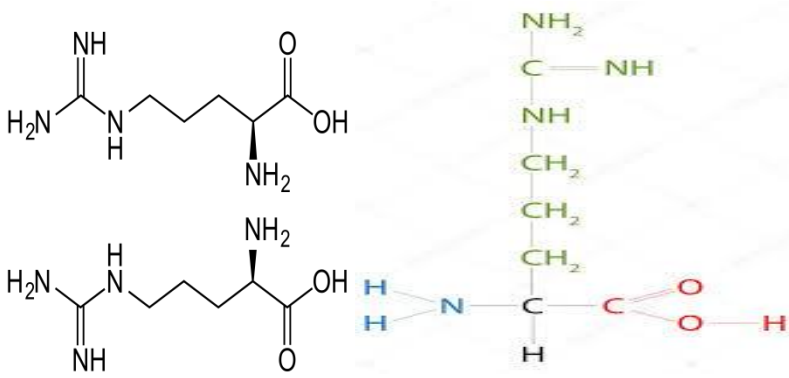
GİRİŞ

Araştırmalar, fıstıkta temel beslenmenin ötesinde ek sağlık yararları sağlayabilecek çok sayıda bileşik tespit etmiştir. Fıstık, oksijen eksikliği, tıkalı atardamarlar sırasında kalbi koruyan koenzim Q10 gibi çok sayıda işlevsel bileşene sahip işlevsel bir gıda olduğunu göstermiştir. Fıstık ayrıca iyi bir diyet lifi kaynağıdır ve çeşitli B grubu vitaminleri, E vitamini, demir, çinko, potasyum ve magnezyum gibi mineraller, selenyum, manganez ve bakır gibi antioksidan mineraller ve flavonoidler ve resveratrol gibi diğer antioksidan bileşikler dahil olmak üzere çok çeşitli temel besin maddeleri sağlar (Geulein, 2010). Yer fıstığındaki faydalı biyoaktif bileşenler, bazı hastalıkların önlenmesi veya iyileştirilmesi için insan metabolizmasında önemli rol oynar ve bazıları antioksidanken diğerleri uzun ömürlülüğü teşvik eder. Fıstıktaki antioksidan kapasitesi, fıstık çekirdeğindeki yağdaki E vitamini veya klorojenik asit, kafeik asit, kumarik asit, ferulik asit, flavonoidler ve resveratrol gibi toplam biyolojik maddelerden kaynaklanmaktadır (Yu ve ark., 2006). Bu çalışma ile yerfıstığında bulunan arginin, resveratrol, fitosteroller, fenolik maddeler ve flavononlar hakkında önemli bilgileri ortaya koymaktı.

ARGİNİN

Yer fıstığı tohumları, insan sağlığı üzerinde birçok olumlu etkisi olan bir amino asit olan arginin açısından zengindir. Yer fıstığındaki protein bitkilerden geldiği için hayvansal proteinden farklı özelliklere sahiptir, yani lif ve arginin gibi biyoaktif maddeler içerir. Arginin kan şekerini enerjiye dönüştürür ve kan akışını iyileştirmeye, atardamarlarımızı gevşetmeye ve kan basıncını düşürmeye yardımcı olabilen nitrik okside dönüşür (Jain, 2004).

Arginin, atardamarların gevşemesini sağlayarak vücuttaki dokularda kan akışını ve iyileşme süresini iyileştirmeye yardımcı olan nitrik oksit öncüsü bir amino asittir (Moncada ve Higgs, 1993). Arginin karaciğeri, cildi, eklemleri ve kasları sağlıklı tutmak için gereken bir amino asittir. Arginin, vücudun bağışıklık sistemini güçlendirmeye yardımcı olur, hormonları ve kan şekerini düzenler. Ayrıca, araştırmalar bu amino asidin dolaşımı iyileştirebileceğini ve iktidarsızlık ve kalp hastalıklarını tedavi edebileceğini göstermiştir. Arginin ayrıca yarı-esansiyel bir amino asit olarak kabul edilir, çünkü vücut kendi tedarikini üretse de, ciddi yaralar veya hastalıklar gibi durumlarda diyet takviyesi gerekebilir. Son çalışmalar, argininin AIDS, kanser ve baskılanmış bağışıklık sistemiyle bağlantılı diğer hastalıkların tedavisindeki potansiyeline odaklanmıştır. Fonksiyonel aktivite bağlamında, Duggan ve arkadaşları (2002), argininin gastro intestinal sistem için koruyucu besinlerden biri olduğunu iddia etmiştir. Argininin kimyasal yapısı Şekil 1'de görüldüğü gibidir.



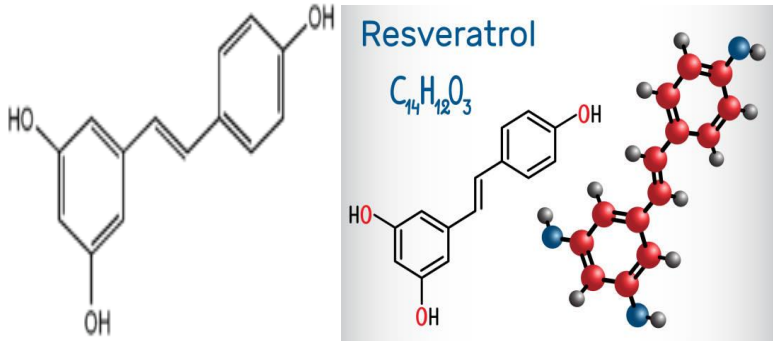
Şekil1: Arginin kimyasal yapısı

(https://tr.wikipedia.org/wiki/Arjinin, 2024)

RESVERATROL

İnsan beslenmesinde resveratrolün başlıca yiyecek ve içecek kaynakları fıstık, fıstık ezmesi, üzüm ve kırmızı şaraplardır (King ve ark., 2006). Resveratrol (3,4′,5-trihidroksistilben), stilbenler adı verilen bir polifenolik bileşik sınıfına aittir. Bazı bitki türleri stres, yaralanma, mantar enfeksiyonu veya ultraviyole radyasyona yanıt olarak resveratrol ve diğer stilbenleri üretir (Jeandet ve ark., 2012). Resveratrol, trans ve cis konfigürasyonunda bulunan yağda çözünen bir bileşiktir. Hem cis- hem de trans-resveratrol, glikozitler (bir glikoz molekülüne bağlı) olarak da bulunur.

Resveratrolün kardiyovasküler hastalık riskini azaltabileceğine dair kanıtlar vardır (Delmas ve ark., 2006). Resveratrolün ayrıca kanser başlangıcını ve ilerlemesini engellediği gösterilmiştir (Gagliano ve ark., 2010). Daha yakın zamanda, resveratrolün Alzheimer hastalığı riskini azaltmada rol oynadığı ortaya çıktı (Baur ve ark., 2006). Resveratrol'ün kimyasal yapısı Şekil 2'de görüldüğü gibidir.

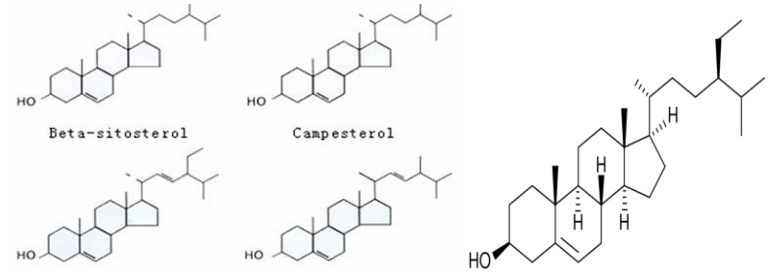


Şekil 2: Resvetrol'ün kimyasal yapısı.

(https://tr.wikipedia.org/wiki/Resveratrol, 2024)

FİTOSTEROLLER

Fitosteroller bitki hücre zarlarında bulunan doğal olarak oluşan bir grup bileşiktir. Yer fıstığı, yer fıstığı ezmesi, yer fıstığı unu ve yer fıstığı yağı, günlük alınan yiyeceklerden kolesterol emilimini engelleyen beta sitosterol, kampesteroller ve stigmasterol gibi fitosterollerce zengindir (Lopes ve ark., 2011). Fitosteroller günlük olarak az miktarda yer fıstığı yiyen nüfus gruplarında gösterilen kalp hastalığı riskini azaltmaya da katkıda bulunabilir (Awad ve ark., 2000). Yer fıstığı fitosterollerinin, sindirim sisteminde kolesterol ile rekabet ederek ve emilimi önleyerek LDL kolesterolü düşürmeye yardımcı olduğu gösterilmiştir. Başlıca fitosterollerden biri olan stigmasterol, antihiperkolesterolemik, antiinflamatuar, antioksidan, hipoglisemik ve antitümör etkili bir madde olarak farmakolojik önemi açısından araştırılmıştır (Burg ve ark., 2013). Fitosterol'ün kimyasal yapısı Şekil 3'de görüldüğü gibidir.



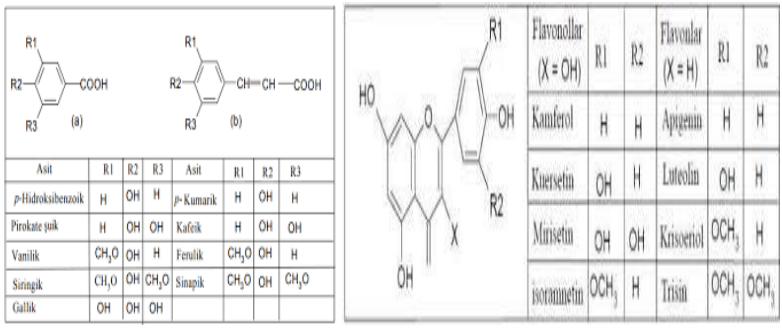
Şekil 3: Fitosterol'ün kimyasal yapısı

(https://tr.wikipedia.org/wiki/Fitosterol, 2024)

FENOLİK ASİT VE FLAVONOLLER

Yer fıstığı da dahil olmak üzere kuruyemişler ve yağlı tohumlar , bunların ürünleri ve yan ürünleri, fenolik bileşiklerin iyi bilinen kaynaklarıdır (Alasalvar ve Bolling, 2015). Fenolikler ve polifenolikler, kardiyovasküler hastalıklar, diyabet ve obezitenin önlenmesi yoluyla çok çeşitli sağlık yararları sağlayabilir. Dahası, antikanser, antiinflamatuar ve antimikrobiyal etkileri de kanıtlanmıştır (Shahidi ve Ambigaipalan, 2015).

Araştırmalar, fıstıkların ve kabuklarının fenolik asitler de dahil olmak üzere işlevsel bileşiklerin olağanüstü kaynakları olduğunu açıkça göstermektedir (Francisco ve Resurreccion, 2008). Araştırma çalışmaları, fıstıkların öncelikle p-kumarik asit seviyelerinde yüksek konsantrasyonlarda polifenolik antioksidanlar içerdiğini ve genel antioksidan içeriğini %22'ye kadar artırdığını göstermiştir (Duncan ve ark., 2006). Ayrıca kavrulmuş fıstık kabuğunun kavrulmuş bütün fıstıktan daha fazla antioksidan kapasitesine sahip olduğunu açıklamışlardır. Lopes ve ark. (2011) ayrıca fenolik asitlerin antioksidanlar olarak rolünü açıklamışlardır. Fenolik asit ve flavonollerin kimyasal yapısı Şekil 4'de görüldüğü gibidir.



Asit	R1	R2	R3	Asit	R1	R2	R3
p-Hidroksibenzoik	H	OH	H	*p*-Kumarik	H	OH	H
Pirokatesuik	H	OH	OH	Kafeik	H	OH	OH
Vanilik	CH_3O	OH	H	Ferulik	CH_3O	OH	H
Siringik	CH_3O	OH	CH_3O	Sinapik	CH_3O	OH	CH_3O
Gallik	OH	OH	OH				

Şekil 4: Fenolik asit (Nizamlıoğlu ve Nas, 2010) ve flavonollerin kimyasal yapısı (Dai ve Mumper, 2010)

SONUÇ

Yer fıstığı, arginin gibi zengin gıda bileşimine sahip doğal bir üründür. Yer fıstığı, stilbenler, flavonoidler, fenolik asitler, steroidler vs. sayasinde antikanser, kardiyovasküler koruma, anti-inflamasyon, antioksidasyon, anti-bakteri ve bağırsak florasının düzenlenmesi gibi biyolojik aktivitesini doğrudan belirleyen diğer kimyasal bileşenleri içerir. Düzenli yer fıstığı tüketiminde bir çok hastalıklara ve hastalık metobolizmalarına olumlu yönde eti eder. Yer fıstığındaki en önemli biyolojik aktivite resveratroldür. Resveratrolün yanı sıra stilbenoidlerde antimikrobiyal ajanlar içermektedir. Yer fıstığının içerdiği besin bileşiminin zengin olmasından kaynaklı düzenli yer fıstığı tüketilmelidir.

KAYNAKÇA

Alasalvar, C., & Bolling, B. W. (2015). Review of nut phytochemicals, fat-soluble bioactives, antioxidant components and health effects. British Journal of Nutrition, 113(S2), S68-S78.

Awad, A,B,, Chan, K.C., Downie, A.C., Fink, C.S. (2000). Peanuts as a source of β-sitosterol, a sterol with anticancer properties. Nutr Cancer 36(2):238–241.

Baur, J.A., Pearson, K.J., Price, N.L., Jamieson, H.A. et al (2006). Resveratrol improves health and survival of mice on a high-calorie diet. Nature 444:337–342.

Burg, V.K., Grimm, H.S., Rothhaar, T.L., Grösgen, S., Hundsdörfer, B., Haupenthal, V.J., Zimmer, V.C., Mett, J., Weingärtner, O., Laufs, U., et al. (2013). Plant Sterols the Better Cholesterol in Alzheimer's Disease? A Mechanistical Study. J. Neurosci. 33, 16072–16087.

Dai, J., & Mumper, R. J. (2010). Plant phenolics: extraction, analysis and their antioxidant and anticancer properties. Molecules, 15(10), 7313-7352.

Delmas, D., Lançon, A., Colin, D., Jannin, B., Latruffe, N. (2006). Resveratrol as a chemopreventive agent: a promising molecule for fighting cancer. Curr Drug Targets 7(4):423–442.

Duggan, C., Gannon, J., Walker, W.A. (2002). Protective nutrient and functional foods for the gastrointestinal tract 1–3. Am J Clin Nutr 75:789–80.

Duncan, C.E., Gorbet, D.W., Talcott, S.T. (2006). Phytochemical content and antioxidant capacity of water-soluble isolates from peanuts (Arachis hypogaea L.). Food Res Int 39(8):898–904.

Francisco, M.L., Resurreccion, A.V. (2008). Functional components in peanuts. Crit Rev Food Sci Nutr 48(8):715–746.

Gagliano, N., Aldini, G., Colombo, G., Rossi, R., Colombo, R., Gioia, M., Milzani, A., Dalle-Donne, I. (2010). The potential of resveratrol against human gliomas. Anti Cancer Drug 21:140–150.

Geulein, I. (2010). Antioxidant properties of resveratrol:a structure activity insight. Innov Food Sci Emerg Technol 11:210–218.

(https://tr.wikipedia.org/wiki/Arjinin, 2024)

(https://tr.wikipedia.org/wiki/Fitosterol, 2024)

(https://tr.wikipedia.org/wiki/Resveratrol, 2024)

Jain, A. K. (2004). Cloning and structural analysis of a cDNA clone encoding glycinin (Gly-1) seed storage protein of peanut. Electronic Journal of Biotechnology, 7(3), 03-04.

Jeandet, P., Delaunois, B., Aziz, A., Donnez, D., Vasserot, Y., Cordelier, S., & Courot, E. (2012). Metabolic engineering of yeast and plants for the production

of the biologically active hydroxystilbene, resveratrol. BioMed Research International, 2012(1), 579089.

Lopes, R.M., Agostini-Costa, T.D.S., Gimenes, M.A., Silveira, D. (2011). Chemical composition and biological activities of Arachis species. J Agri Food Chem 59(9):4321–4330.

Moncada, S., Higgs, A. (1993). The L-arginine-nitric oxide pathway. N Engl J Med 329:2002–2012.

NİZAMLIOĞLU, N.M., & Sebahattin N.A.S. (2010). Meyve ve sebzelerde bulunan fenolik bileşikler; yapıları ve önemleri. Electronic Journal of Food Technologies, 5(1), 20-35.

Shahidi, F., & Ambigaipalan, P. (2015). Phenolics and polyphenolics in foods, beverages and spices: Antioxidant activity and health effects–A review. Journal of functional foods, 18, 820-897.

Yu, J.M., Ahmedna, M., Goktepe, I., Dai, J. (2006). Peanut skin procyanidins : composition and antioxidant activities as affected by processing. J Food Compos Anal 19:364–371.



Yer Fıstığında Bulunan Proteinler ve Önemi

Fatma Hepsağ [1] ***& Sevde Nur Tanç*** [2]

[1] Doç. Dr, Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Kadirli Uygulamalı Bilimler Fakültesi, Gıda Teknolojisi Bölümü, Kadirli 80750 Osmaniye, Türkiye. ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-3688-4106
[2] Yüksek Lisans Öğrencisi, Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Kadirli Uygulamalı Bilimler Fakültesi, Gıda Teknolojisi Bölümü, Kadirli 80750 Osmaniye, Türkiye. ORCID ID: https://orcid.org/0009-0009-0138-2542

GİRİŞ

Yer fıstığı, teknik olarak bezelye olarak kabul edilen, baklagiller familyasına ait olup baklagil bitkisinin yenilebilir tohumlarıdır. Yüksek yağ içeriği nedeniyle genellikle yağlı tohumlar arasında sayılmaktadır. Yer fıstığı protein, yağ ve lif açısından zengindir (Suchoszek-Lukaniuk ve ark., 2011). Son yıllarda, yeni protein kaynakları arayışı her zamankinden daha yüksek seviyede olmaktadır. Hayvansal proteinler dengeli amino asit profillerine sahip birincil kaynaklar olmasına rağmen, bitki bazlı protein talebi çeşitli nedenlerle artmıştır. Bitkisel proteinler, 2050 yılına kadar 10 milyara ulaşması beklenen büyüyen bir nüfusu beslemek için gıda uygulamalarında alternatif olarak araştırılmaktadır. Bu proteinler uygun fiyatlıdır, mevcuttur ve hayvansal kaynaklardan elde edilenlere kıyasla düşük çevresel etkiye sahiptir. Et ve hayvansal ürünlerin aşırı tüketimiyle ilgili sağlık endişeleri, vegan veya vejetaryen olarak et tüketimini azaltmayı veya diyetlerinden et tüketimini çıkarmayı seçen bazı sağlık bilincine sahip tüketiciler için de endişe vericidir (Boukid, 2020).

Bitkisel proteinler çok yönlüdür ve tahıllar, baklagiller ve yağlı tohumlar gibi farklı kaynaklardan elde edilebilir. Yer fıstığı (*Arachis hypogae , L.*) dünyadaki dördüncü önemli yağlı tohumdur. Yer fıstığı, baklagil ailesi (*fabaceae*) arasında sınıflandırılır ve baklagillerle karşılaştırılabilir protein içeriğine sahiptir ve genellikle %45 yüksek yağ ve %22-33 protein içeriği nedeniyle yağlı tohumlar arasında sayılır (Arya ve ark., 2016). Yağ çıkarıldıktan sonra yağsız öğütülmüş un veya yağ keki %50-%60'a kadar protein içerir ve genellikle gübre, yem veya yakıt olarak kullanılır (Zhao ve ark., 2020). Yer fıstığı proteininin besin değeri yüksektir ve hayvansal proteinlere benzer. Bu proteinler düşük düzeyde antinutrisyonel faktöre ve kolayca sindirilebilen mükemmel aminoasit profiline sahiptir. Ayrıca arzu edilen aroma ve tada sahiptirler ve potansiyel bir protein ikamesi olarak kullanılabilecek beyaz bir renge sahiptirler (Phongthai ve ark., 2020).

YERFISTIĞINDA BULUNAN PROTEİNLER

Fıstık proteini bileşenlerinin bileşimi, yapısı, yüzey özellikleri, fizikokimyasal özellikleri ve işlevsel özellikleri yerfıstığından çıkarma işlemine bağlıdır (Sun ve ark., 2021). Bu şekilde, fıstık proteini daha iyi çözünürlük, emülsifikasyon , köpürme, jelleşme, su tutma, yağ tutma ve diğer işlevsel özellikler üretebilir ve gıdanın oluşumu, görünümü, dokusu ve stabilitesi üzerinde olumlu bir etkiye sahip olabilir ve gıda endüstrisinde uygulanmasına elverişlidir (Feng ve ark., 2020). Bu alandaki temel zorluklardan biri, fıstık proteinlerinin genellikle fıstıklardan yağ çıkarmak için kullanılan geleneksel yöntemlerin bir yan ürünü olarak elde edilmesidir. Sonuç olarak, yağ çıkarma işlemi sırasında genellikle denatüre olurlar

ve bu da işlevsel özelliklerinin azalmasına veya kaybolmasına neden olur. Gerçekten de, birçok geleneksel fıstık proteini bileşeninin, örneğin çözünürlük veya jelleşme gibi zayıf işlevsel performansları nedeniyle gıdalarda sınırlı uygulaması vardır. Bu nedenle, araştırmacılar, iyileştirilmiş işlevselliğe sahip fıstık proteini bileşenleri elde etmek için çeşitli geleneksel ve yeni fiziksel, kimyasal ve enzimatik modifikasyon yöntemlerini araştırmaktadır (Yu ve ark., 2021).

Yer fıstığı proteinleri, esas olarak depolama proteinleri, albüminler ve globulinlerden oluşur. Globulinler (7S ve 11S) toplam proteinin çoğunluğunu (~%75) oluşturur (Ji ve ark., 2018). Yer fıstığı, yüksek protein içeriği ve işlevsel ve besin değerleri nedeniyle dünya çapında popüler bir gıda bileşeni olarak kullanılan mükemmel amino asit profili ile bilinir. İnsan vücudunda 20 amino asit bulunduğunu, bunlardan 11'inin esansiyel olmadığını ve vücudumuzda sürekli sentezlendiğini belirtmek önemlidir. Bununla birlikte, vücut tarafından sentezlenemeyen kalan 9 amino asidin diyetle sağlanması gerekir. Bu temel proteinleri elde etmek için et, baklagiller, fındık, süt (kazein) ve yumurta (albümin) gibi çeşitli kaynaklar vardır. Çalışmalar ayrıca yer fıstığının normal vücut büyümesi ve metabolizması için gerekli olan tüm temel amino asitleri içerdiğini ortaya koymuştur ve bunlar treonin, izolösin, lösin, lizin, metiyonin, sistin, fenilalanin, trozin, valin, arginin, histidin, alanin, aspartik asit, glutamik asit, glisin prolin ve serindir. Genel olarak, glutamik asit , arginin ve aspartik asit amino asitleri baskın durumdadır. Diğer kuruyemişlerle karşılaştırıldığında, yer fıstığının lösin , glisin ve valin gibi daha yüksek hidrofobik amino asitlere sahip olduğu bildirilmiştir (Sandefur ve ark., 2017).

FISTIK PROTEİNİNİN BESİN DEĞERİ

Bir gıda proteininin besin değeri, temel amino asit içeriği ve sindirilebilirliği ile belirlenir. Hayvansal proteinler, kükürt içeren amino asitler ve kolay sindirilebilir olanlar da dahil olmak üzere tüm temel amino asitleri içerir. Ancak, hayvansal ürünleri tüketmeyen veganlar ve vejetaryenler gibi kişiler, fıstık ve soya fasulyesi gibi protein açısından zengin alternatif bitki kaynaklarına bağımlıdır. Fıstığın amino asit bileşimi çeşide ve bitki konumuna göre büyük ölçüde değişse de, fıstıklar değişken oranlarda 20 amino asidin tamamını içerir ve en zengin arginin kaynağıdır (Batal ve ark., 2005). Fıstığın, metiyonin ve sistein gibi kükürt içeren amino asitlerinin içeriği düşüktür. Ancak, tahıl tanelerindeki proteinler metiyonin ve sistein açısından zengin olduğundan, bunlar fıstık ürünlerinin tahıl taneleriyle birlikte tüketilmesiyle tamamlanabilir (Jiang XiaoLing ve ark., 2008).

Hücrelerin, kasların ve organların ihtiyaç duyduğu amino asitleri vücuda sağlamak için sindirilebilir bitki ürünleri türlerinin seçilmesi önemlidir. Yer fıstığı için protein sindirilebilirliği düzeltilmiş amino asit puanı (PDCAAS) %81 (de Oliveira Sousa ve ark., 2011) ve soya fasulyesi için %72'dir (Han ve ark., 2007). Yer fıstığı ve soya fasulyesinden yapılan bir besin çubuğunun sırasıyla %42,28 ve %35,34'lük bir *in vitro protein sindirilebilirliğine sahip olduğu bildirilmiştir* (Garg ve Brar, 2017). Çiğ yer fıstığı için *in vitro* protein sindirilebilirliğinin %92,65 olduğu bildirilmiştir. Bu, soya fasulyesinin yer fıstığından daha fazla protein içermesine rağmen, yer fıstığı proteininin soya proteininden daha fazla biyoyararlanıma sahip olduğunu göstermektedir .

YER FISTIĞININ SAĞLIK AÇISINDAN YARARLARI

Fıstık veya işlenmiş fıstık tüketiminin, doymamış yağ asitleri bakımından daha yüksek olan istenen lipid profili nedeniyle sağlığa yararlı olduğu bildirilmiştir. Fıstık yağı doğal olarak trans yağ ve kolesterol içermez ve doymuş yağ oranı düşüktür. Çoğunlukla yüksek oleik asit içeriğiyle bağlantılı olan birçok olumlu biyolojik etki gösterir. Birçok çalışma, fıstık veya fıstık yağı tüketiminin kardiyovasküler hastalık riskinin düşük olduğunu ve serum lipid profillerini iyileştirebileceğini, LDL oksidasyonunu azaltabileceğini ve kardiyoprotektif bir etki gösterebileceğini ortaya koymuştur. Fıstık ve ürünlerinin sık tüketimi kolorektal kanser riskini azaltabilir (Arya ve ark., 2016).

Yer fıstığı ve yer fıstığı ürünleri tüketen 15.000'den fazla kişide, A vitamini, E vitamini, folat, magnezyum, çinko, demir, kalsiyum ve diyet lifi düzeylerinin yer fıstığı tüketmeyenlere göre daha yüksek olduğu bulunmuştur (Griel ve ark. 2004). Kronik hastalık riskine karşı hipertansiyonu durdurmak İçin Akdeniz diyeti gibi önleyici diyet kalıpları yağlı tohum tüketimi için önerilmektedir (Mohammadifard ve ark., 2015). Yer fıstığı, dünya çapında en yaygın tüketilen yağlı tohumlardan biridir (Toomer, 2018). Yer fıstığı ayrıca antioksidan kapasitesi yüksek ve iyi bir bitkisel protein kaynağıdır. Aynı zamanda, çeşitli hastalık risklerinin azalmasıyla ilişkili olan yüksek miktarda magnezyum, potasyum, fitosteroller ve polifenoller gibi birçok biyoaktif bileşenleride içerir (Mohammadifard ve ark., 2015).

YERFISTIĞINDAN ÜRETİLEN DEĞERLİ ÜRÜNLER

Dünya genelinde fıstık tüketimi büyük oranlarda değişiklik gösterdiğinden ticari ürünler de çeşitlidir ve genellikle yerelleştirilmiştir. Fıstık, kavrulmuş fıstık, fıstık ezmesi, fıstık yağı, fıstık ezmesi, fıstık sosu, fıstık unu, fıstık sütü, fıstık içeceği, fıstık atıştırmalıkları (tuzlu ve tatlı barlar) ve fıstık peyniri benzeri gibi

çeşitli ürünlere dönüştürülmüştür. Çiğ fıstık tüm dünyada tüketilmektedir. Kavrulmuş fıstıklar, fıstıkların nem içeriğine bağlı olarak yaklaşık 12-15 dakika boyunca 180 °C'de veya 40-60 dakika boyunca 160 °C'de ısıtılmasıyla işlenir. Fıstık ezmesine fıstık kabuğu eklenmesinin antioksidan ve toplam fenolik içerik üzerindeki etkisi Yuanyuan ve arkadaşları tarafından incelenmiştir (2014). Hazırlanan fıstık ezmesinde lif, fenolik ve antioksidan içeriğinde önemli bir artış gözlemlemişlerdir. Dünyadaki yer fıstığı üretiminin maksimum miktarı yağ üretimi için kullanılır. Fıstık atıştırmalıkları (tuzlu/tuzsuz) çoğunlukla fıstık çekirdeğinin kızartılması ve kaplanmasıyla hazırlanır (Varela ve Fiszman, 2011). Genellikle yağı çıkarıldıktan sonra yağdan arındırılmış fıstık ununun öğütülmesiyle üretilen fıstık unu, emülsifiye edici özellikleri ve kompozit un olarak, genellikle çorba, kurabiye, köri gibi diğer preparatlarda kullanılır (Tate ve ark., 1990). Ayrıca et ürünlerinin kaplanmasında da kullanılır. Fıstık unu, buğday dışı tahıllarla kompozit unlar yapmak veya ununu baklagil unları gibi protein açısından zengin kaynaklarla desteklemek için kullanılabilir, özellikle buğday üretiminin yetersiz olduğu ülkelerde ekmeğin besin değerini artırabilir (McKEE ve Latner, 2000). Fıstık barları dünyanın her yerinde farklı formlarda tüketilmektedir. Bunlar, çekirdeklerin haşlanması ve neminin alınmasının ardından kısmen öğütülmüş fıstıkların şeker ile kaplanmasıyla hazırlanır. Fıstık sütü, fermente edilmiş fıstık ürünleri, peynir çeşitleri, fıstık içecekleri gibi diğer fıstık ürünleri, üretimleri için kullanılmak ve ticarileştirilmek üzere hala çok popüler değildir; örneğin Chandrashekhara ve diğerlerine (1971) göre, fıstık sütü, bir hacim çiğ fıstığın 6 hacim suyla 30 dakika öğütülmesiyle oluşan çamurdan yapılır. pH 9,0'a ayarlanır ve bir krema ayırıcı kullanılarak yağ, nişasta ve liften uzaklaştırılır. Bu işlem, neredeyse yağsız sarı bir sıvı sağlar ve yüksek proteinli süt oluşturur.

SONUÇ

Yer fıstığı, zengin bir besin profiline sahip geniş bir kimyasal bileşik dizisi ve mükemmel bir sağlık geliştirici madde kaynağı içerir. Bu çok amaçlı ürün, birçok ülkenin ekonomisinde önemli bir rol oynayan yağ ve protein çıkarmak, farklı ürünlere işleyerek kullanılmaktadır. Düzenli tüketimde fıstığın bir çok rahatsızlıklarıda önleyebileceği konusunda farkındalığın yayılmasına daha fazla ihtiyaç vardır. Bu çalışmayla, yer fıstığının yapısal bileşenlerinden proteinlerin tüm yönlerini ele almak ve yerfıstığı proteinlerinin bir bitkisel protein olarak sağlık yararları üzerinde durularak genel bir bakış sunulmuştur.

KAYNAKÇA

Arya, S.S., Salve, A.R. & Chauhan, S. (2016). Peanuts as unctional food: a review. Journal of Food Science and Technology, 53, 31.

Arya, S.S., Salve, A.R., Chauhan, S. (2016). Peanuts as functional food: a review. J Food Sci Technol 53:31–41

Batal, A., Dale, N., & Café, M. (2005). Nutrient composition of peanut meal. Journal of applied poultry research, 14(2), 254-257.

Boukid, F., Zannini, E., Carini, E. & Vittadini, E. (2019). Pulses for bread fortification: A necessity or a choice? Trends in Food Science & Technology, 88, 416–428

Chandrashekhara, M.R., Ramanna, B.R., Jagannath, K.S., Ramanathan, P.K. (1971). Miltone vegetable toned milk. J Food Technol 25:596–598.

de Oliveira Sousa, A. G., Fernandes, D. C., Alves, A. M., de Freitas, J. B., & Naves, M. M. V. (2011). Nutritional quality and protein value of exotic almonds and nut from the Brazilian Savanna compared to peanut. Food Research International, 44(7), 2319-2325.

Feng, H., Jin, H., Gao, Y., Yan, S., Zhang, Y., Zhao, Q., & Xu, J. (2020). Effects of freeze-thaw cycles on the structure and emulsifying properties of peanut protein isolates. Food chemistry, 330, 127215.

Garg, P., & Brar, J. K. (2017). Development and organoleptic evaluation of nutritious bars by using defatted peanut flour, roasted soybean seeds for gym trainees. Chemical Science Review and Letters, 6(23), 2051-2057.

Griel, A.E., Eissenstat, B., Juturu, V., Hsieh, G., Kris-Etherton, P.M. (2004). Improved diet quality with peanut consumption. J Am Coll Nutr 23(6):660–668.

Han, I. H., Swanson, B. G., & Baik, B. K. (2007). Protein digestibility of selected legumes treated with ultrasound and high hydrostatic pressure during soaking. Cereal chemistry, 84(5), 518-521.

Jiang XiaoLing, J. X., Tian JiChun, T. J., Hao Zhi, H. Z., & Zhang WeiDong, Z. W. (2008). Protein content and amino acid composition in grains of wheat-related species.

Ji, H., Dong, S., Han, F., Li, Y., Chen, G., Li, L., & Chen, Y. (2018). Effects of dielectric barrier discharge (DBD) cold plasma treatment on physicochemical and functional properties of peanut protein. Food and Bioprocess Technology, 11, 344-354.

McKEE, L., Latner, T.A. (2000). Underutilized sources of dietary fiber: A review. Plant Foods Hum Nutri 55(4):285–304.

Phongthai, S., Singsaeng, N., Nhoo-ied, R. et al. (2020). Properties of Peanut (KAC431) Protein Hydrolysates and Their Impact on the Quality of Gluten-Free Rice Bread. Foods, 9, 942

Sandefur, H. N., McCarty, J. A., Boles, E. C., & Matlock, M. D. (2017). Peanut products as a protein source: Production, nutrition, and environmental impact. In Sustainable Protein Sources (pp. 209-221). Academic Press.

Suchoszek-Lukaniuk, K., Jaromin, A., Korycińska, M., Kozubek, A. (2011). Nuts and seeds in health and disease prevention. Elsevier

Sun, X., Zhang, W., Zhang, L., Tian, S., & Chen, F. (2021). Effect of ultrasound-assisted extraction on the structure and emulsifying properties of peanut protein isolate. Journal of the Science of Food and Agriculture, 101(3), 1150-1160.

Tate, P.V., Chavan, J.K., Patil, P.B., Kadam, S.S. (1990). Processing of commercial peanut cake into food grade meal and its utilization in preparation of cookies. Plant Foods Hum Nutr 40:115–121.

Varela, P., Fiszman, S.M. (2011). Hydrocolloids in fried foods. A review. Food Hydrocoll 25(8):1801–1812.

Yuanyuan, M.A., William, L.K., Ruthann, B.S., James, L.H., Ronald, B.P. (2014). Peanut skin-fortified peanut butters; effect of processing on the phenolics content, fibre content and antioxidant activity. Food Chem 145:883–889.

Yu, J. J., Chen, G. Y., Zhang, Y. F., Zheng, X. C., Jiang, P. Y., Ji, H., ... & Chen, Y. (2021). Enhanced hydration properties and antioxidant activity of peanut protein by covalently binding with sesbania gum via cold plasma treatment. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 68, 102632.

Zhao, Q., Li, P., Wang, M., Zhang, W., Zhao, W. & Yang, R. (2020). Fate of phospholipids during aqueous extraction processing of peanut and effect of demulsification treatments on oilphosphorus-content. Food Chemistry, 331, 127367.

BÖLÜM 46

Hedef Odaklı Kimlik Avı Saldırıları: Saldırı Yöntemi ve Önleme Yolları

Sudenur Muratoğulları[1] Semih Çakır[2]

[1] Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, ORCID: 0009-0002-0820-8546
[2] Dr. Öğr. Üyesi, Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Kdz. Ereğli Meslek Yüksekokulu ORCID: 0000-0003-3072-9532

1. GİRİŞ

Siber güvenlik ile ilgili olarak tehditler gün geçtikçe artmaya devam etmektedir. Farklı yöntemler ve yenilikçi yaklaşımlar ile tehditler karşısında kullanıcılar, kamu-kurum ve kuruluşları ile kitlesel olarak ülkeler zor durumda kalabilmektedir. Sosyal mühendislik saldırılarında da var olan artış hızla devam etmekte ve güvenlik ağını zayıflatmaktadır. Bu zayıflama neticesinde siber saldırganlar hem kullanıcıları hem de kuruluşları hassas verileri ele geçirmek ve paylaşmak ile tehdit etmektedir (Kalnin, vd., 2017; Salahdine ve Kaabouch, 2019).

Sosyal mühendislik yöntemi ile saldırganlar, güvenlik zincirinin en zayıf halkası olan insan üzerinden alt yapıya yönelik saldırılar geliştirerek gelişmiş siber tehdit unsurları ile siber dayanıklılığı zayıflatmaktadırlar. İnsan etkileşimleri ile sosyal mühendislik saldırıları alt yapıdan uç noktaya kadar tüm sistemi ve ağ ekosistemini tehdit ettiklerinden dolayı en etkili saldırılar arasında yer almaktadır. Günümüz siber güvenlik dünyasında karşılaşılan en yaygın saldırı türü olarak da ifade edilmektedir (Chargo, 2018; Pavković ve Perkov, 2011). Verilerin ifşası, maddi kazanç amaçlı karanlık web (dark web) ortamlarında verilerin paylaşımı, itibar kazanma ve kendini kanıtlama amaçlı siber saldırganlar tarafından uygulandığı bilinmektedir. Hedef odaklı kimlik avı saldırıları sosyal mühendislik saldırı türlerinden biridir. Bu saldırıya benzer şekilde yöntem olarak aynı uygulama alanı olarak farklı sosyal mühendislik saldırı türleri bulunmaktadır. Ancak bu farklılıkların ortak yanı bulunmaktadır. Şekil1.'de sosyal mühendislik saldırılarının ortak oluş evreleri verilmiştir.

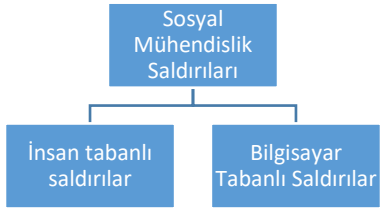


Şekil 1. Sosyal mühendislik saldırılarının oluşum evreleri

Saldırı oluşum evrelerinin ilkini keşif oluşturmaktadır. Keşif aşamasında amaç bilgi toplamaktır. Hedefe ait e-posta bilgileri, sosyal ağ madenciliği, nitelikli veriler keşifin amacını oluşturmaktadır. İkinci aşama olan hedefle temasta ise bir önceki evrede elde edilen veriler kullanılarak hedefle stratejik yakın temasa geçilir ve saldırı öncesi zafiyet elde etme ortamı oluşturulur. Üçüncü evre saldırı da ise sahte web sayfaları ile kimlik saldırısı, hedefli e-posta saldırısı ile URL gönderimi, zararlı e-posta ekleri ve USB çıkarılabilir medya aygıtları kul-

lanılarak saldırganın doğrudan farkına varamayacağı saldırı aşaması gerçekleştirilir. Son aşama olan iz bırakmama da ise oltaya getirilen kişi/kurum ile ilgili elde edilen kazanımlar ile saldırı sonlandırılır.

Sosyal mühendislik saldırıları iki kategoride incelenebilir: kullanıcı (insan) tabanlı ya da bilgisayar tabanlı olarak Şekil 2.'de verilmiştir (Xiangyu, vd., 2017).



Şekil 2. Sosyal mühendislik saldırı kategorileri

İnsan tabanlı saldırılarda saldırgan, hedefindeki kişiyle birebir etkileşime girerek saldırıyı gerçekleştirmektedir. Bu saldırı türündeki kurban sayısı saldırganın kişisel becerisine bağlı olduğundan oldukça sınırlı sayıda hedef bu saldırıdan etkilenebilir. Bilgisayar tabanlı saldırılarda ise saldırgan yazılım desteğinden faydalandığından hedeften bilgi almak için taşınabilir mobil cihazlar veya bilgisayar kullanmaktadır. Saldırganlar çok kısa sürede hedefi ikna ederek saldırıyı gerçekleştirebilir. Hedef odaklı kimlik avı saldırılarında en sık kullanılan e-posta ve içerikleri bilgisayar tabanlı saldırılardan biridir (Koyun ve Aljanaby, 2017).

Sosyal mühendislik saldırıları ile ilgili olarak literatürde birçok çalışma ve araştırma bulunmaktadır. Verizon (2024)'da ifade edildiği üzere güvenlik ihlallerinin %68'i sosyal mühendislik saldırılarına maruz kalan kötü niyetli olmayan kullanıcılar tarafından oluşturulmuştur.

IBM (2023) raporuna göre kimlik avı saldırıları, tüm veri ihlallerinin %36'sını oluşturmaktadır. Kimlik avı saldırıları, sosyal mühendisliğin kullanılan en yaygın türlerinden biri olup dünya genelinde etkili olmayı sürdürmektedir. Aynı araştırma da bu saldırıların özellikle kurumları hedef aldığı ifade edilmektedir. Veri ihlalleri haricinde bu saldırıların büyük boyutlu maddi kayıplara ve zararlara da yol açtığı belirtilmektedir. Dünya genelinde iki yılı aşkın süre etkili olan Covid salgınında (Covid-19 pandemisi) uzaktan çalışma modelinin yaygınlaşması ile sağlık endişeleri neticesinde sosyal mühendislik saldırılarında %220 oranında artış meydana geldiği vurgulanmaktadır.

Proofpoint (2023)'in yayınladığı rapora göre hedefe yönelik gerçekleştirilen kimlik avı saldırılarında kişiselleştirilmiş mesajlar kullanılarak yapılan saldırılarda başarı oranının arttığı belirtilmektedir. Hedefli sosyal mühendislik saldırılarında başarı oranının %66 olduğu özellikle üst düzey yöneticilerin ve finans sorumlularının hedefler arasında olduğu belirtilmektedir.

Bu çalışmada, hedef odaklı kimlik avı saldırılarının oluşumu, saldırının işleyiş biçimi ve hedeflerin nasıl seçildiği örnek senaryo üzerinden anlatılacaktır. Özellikle finansal verilerin işlendiği işletmelerde ki ilgili bölümler, bu tür saldırıların hedefinde sıklıkla yer almaktadır.

Çalışmada adı "x" olarak belirtilen şirket örneğinde olduğu gibi, bir finans çalışanı, şirketin önemli finansal bilgilerinin bulunduğu ödeme işlemleri, banka hesap bilgileri ve vergi raporlaması gibi alanlarda kritik bir rol üstlenmektedir. Bu nedenle, siber saldırganlar için oldukça değerli bir hedef haline gelmektedir. Saldırganlar, bu kişilere dair her türlü bilgiyi toplar ve onların güvenini kazanmaya çalışarak, şirketin ekonomik geleceğini tehdit edebilirler.

2. HEDEF ODAKLI KİMLİK AVI SALDIRILARI

Siber güvenlik dünyasında, hedef odaklı kimlik avı saldırıları (spear phishing), oltalama saldırılarından biri olarak siber suçluların daha karmaşık ve kişiselleştirilmiş yöntemlerle bireyleri ve organizasyonları hedef aldığı oldukça tehlikeli bir tehdit türüdür. Oltalama saldırılarının temel amacı, kullanıcıları aldatmak ve onlardan hassas bilgileri çalmaktır. (Yeboah vd., 2014). Ancak spear phishing, genel oltalama saldırılarından farklı olarak, belirli bir hedefin hayatına ve işine dair derinlemesine bilgi toplama süreci içerir. Saldırganlar, hedeflerini daha iyi manipüle edebilmek amacıyla, bu kişilerin dijital izlerini takip eder. Sosyal medya hesaplarından, iş geçmişlerinden, şirket içi yazışmalardan ve profesyonel ağlardan elde ettikleri bilgilerle saldırılarını daha inandırıcı ve etkili hale getirirler. Spear phishing, modern siber tehditlerin önemli bir parçasıdır ve hem bireyler hem de organizasyonlar için ciddi sonuçlar doğurabilir.

Spear phishing saldırılarında hedefi belirlemek oldukça önemlidir. Saldırgan, hedefin davranışlarını ve psikolojik durumunu analiz ederek, güven kazanmak ve güvenilir bir saldırı düzenlemek için çeşitli yöntemler geliştirir. Saldırgan, hedefini manipüle edebilmek için kişisel, profesyonel ve dijital izlerini dikkatlice takip etmektedir. Kurum ve kuruluşlarda finans bölümü çalışanları şirketin mali işlemleri ve finansal verilerini yönettiği için siber saldırganlar için cazip bir hedeftir. Bu kişinin işlediği bilgiler ve verdiği kararlar, şirketin ekonomik gelece-

ğini etkileyebilir. Finans bölümü, ödeme işlemleri, banka hesapları ve vergi raporlaması gibi yüksek riskli alanlar içerdiği için, saldırganlar için kritik bir hedef oluşturur.

2.1. Kritik Finansal Verilere Erişimde Hedefin Önemi

Finans bölümündeki bir çalışan, şirketin mali durumunu etkileyen verilerle doğrudan ilişkilidir. Bu, ödeme işlemleri, banka hesap bilgileri ve finansal raporları içerir.

- ***Banka Hesapları ve Ödemeler:*** Çalışan, şirketin banka hesapları ve ödeme talimatları gibi hassas bilgilere sahip olup, bu bilgilerin ele geçirilmesi doğrudan maddi kayıplara yol açabilir.
- ***Vergi ve Yasal Belgeler:*** Vergi raporları, yasal belgeler ve finansal düzenlemelere dair bilgiler, siber saldırganlar için önemli hedeflerdir. Bu verilerin kötüye kullanılması şirketin yasal durumunu ve güvenliğini riske atabilir.
- ***Tedarikçi Sözleşmeleri ve İlişkiler:*** Tedarikçi sözleşmeleri, ödeme düzenlemeleri ve dış ticaret anlaşmaları gibi bilgiler, saldırganların sahte ödeme talepleri göndermesine veya şirketin tedarik zincirini hedef almasına olanak tanır.
- ***Şirketin İtibarı ve Müşteri Güveni:*** Finansal verilerin ele geçirilmesi, şirketin itibarını zedeleyebilir ve müşterilerin güvenini kaybetmesine yol açabilir. Bu, uzun vadeli iş ilişkilerine zarar verebilir.
- ***İç İşleyiş ve Stratejik Kararlar:*** Hedefin elde ettiği finansal veriler, sadece operasyonel süreçleri değil, şirketin stratejik kararlarını da etkiler. Bu nedenle, saldırganlar bu verilere ulaşarak şirketin geleceğini manipüle edebilir.

2.2. Bilgi Toplama Aşaması

Spear phishing saldırılarının temel aşaması, hedef hakkında detaylı bilgi toplamaktır. Bu bilgi toplama süreci, saldırganın hedefini manipüle etmesini ve başarılı bir saldırı gerçekleştirmesini sağlar. Toplanan bilgilerin doğruluğu, saldırının başarısını doğrudan etkiler. Bu aşama, birden fazla kaynağın ve çeşitli tekniklerin kullanıldığı bir süreçtir.

2.2.1. Sosyal Medya Analizi

Saldırgan, hedefinin sosyal medya hesaplarını inceleyerek başlar. Bu hesaplar, kişinin günlük yaşamı hakkında bilgi sağlayan zengin bir kaynak sunar. Hedefin Facebook, Instagram ve Twitter (X platformu) gibi platformlarda paylaştığı içerikler, saldırgan için önemli ipuçları içerir.

- *Kişisel Bilgilerin Elde Edilmesi:* Saldırgan kişinin ilgi alanları, hobileri ve sosyal çevresi hakkında bilgi toplar. Örneğin, kişinin paylaştığı fotoğraflar, katıldığı etkinlikler ve arkadaşları ile olan etkileşimleri, saldırganın kişisel bağlamda ilişki kurmasına yardımcı olur. Bu bilgiler, e-posta içeriğinin daha samimi ve inandırıcı olmasını sağlar.
- *Etkinlik Katılımları:* Kişinin katıldığı etkinlikler veya paylaştığı anılar, saldırganın mesajını özelleştirmesine olanak tanır. Örneğin, kişinin bir sektör konferansına katıldığı bilgisi, e-posta içeriğinde bu etkinlikle ilgili bir referans olarak kullanılabilir. Böylece, hedefe yönelik yapılan iletişim daha kişisel bir hal alır ve e-postanın açılma olasılığı artar.
- *İş Unvanı ve Görev Tanımları:* Saldırgan, kişinin iş unvanını ve mevcut görev tanımlarını analiz eder. Bu bilgiler, kişinin sorumluluklarını ve iş süreçlerini anlamak için önemlidir. Hedefin pozisyonu, e-posta içeriğinde kullanılacak tekniklerin belirlenmesinde kritik bir rol oynar.
- *Geçmiş İş Deneyimleri:* Kişinin daha önce çalıştığı şirketler ve görevleri hakkında bilgi edinmek, saldırganın hedefin kariyer yolculuğunu anlamasına yardımcı olur. Bu bilgiler, hedefin olası zayıflıklarını keşfetmek için de kullanılabilir.
- *Meslektaşlar ve Profesyonel İlişkiler:* Saldırgan, kişinin sıkça iletişimde bulunduğu kişiler ve meslektaşları hakkında bilgi toplayarak, bu kişileri de hedef alabilir. Hedefin ağında bulunan diğer bireylerin sosyal mühendislik saldırılarına dahil edilmesi, saldırganın kapsamını genişletir.
- *Projeler ve Başarılar:* Kişinin çalıştığı projeler veya elde ettiği başarılar, saldırganın e-postasında referans olarak kullanılabilir. Örneğin, başarılı bir projeyi kutlayan bir mesaj, hedefin ilgisini çekebilir ve e-postayı açma olasılığını artırabilir.

2.2.2. Şirket Bilgileri

Saldırgan, yalnızca hedefe odaklanmakla kalmayıp aynı zamanda hedefin çalıştığı şirket hakkında da bilgi toplamaya özen göstermektedir. Bu aşama, şirketin genel yapısını ve hedefin rolünü daha iyi anlamak için kritik öneme sahiptir.

- *Şirket Web Sitesi ve Yıllık Raporlar:* "x" şirketinin resmi web sitesi, yıllık raporları ve basın bültenleri, şirketin mali durumu, stratejik hedefleri ve projeleri hakkında derinlemesine bilgi sağlar. Saldırgan, bu bilgileri kullanarak, hedefe daha uygun bir bağlamda e-posta gönderebilir.
- *Yönetim Yapısı ve Önemli Projeler:* Şirketin yönetim yapısı, hangi kişilerin kritik kararlar aldığı hakkında bilgi edinmeyi sağlar. Ayrıca, yürütülen önemli projeler ve şirketin gelecekteki hedefleri hakkında bilgi sahibi olmak, saldırganın e-posta mesajında geçerli ve etkili referanslar oluşturmasına olanak tanır.
- *Sektörel Analizler:* Saldırgan, sektörle ilgili raporlar ve analizler aracılığıyla, hedefin çalıştığı alan hakkında daha fazla bilgi edinebilir. Bu bilgiler, e-postada kullanılacak jargonun ve konuların belirlenmesine yardımcı olur.

2.3. Saldırı Durumunun Gerçekleştirilmesi

Saldırganlar, hedefe zararlı yazılım (malware) indirmeyi sağlamak amacıyla sosyal mühendislik teknikleri kullanabilirler. Bu tür yazılımlar, hedefin bilgisayarına yerleşerek, şirketin verilerini çalabilir, sistemlere zarar verebilir ve diğer iç kaynaklara erişim sağlayabilir.

- ***Zararlı Yazılım Yükleme Yöntemleri:*** Hedefin kişisel bilgilerini veya şirket içi hassas verileri öğrenen saldırgan, e-posta aracılığıyla sahte dosya veya bağlantılar gönderebilir. Bu bağlantılar, hedefin zararlı yazılımı indirmesini sağlamak amacıyla tasarlanmış olabilir.
- ***Örnek:*** *Hedefe "Yeni Ürün Lansmanı" veya "Acil Ödeme Onayı" ile ilgili bir e-posta gönderilir ve bu e-postada "Fatura Detayları" veya "Ödeme Talimatı" adı altında bir dosya eklenir. Dosya, hedefin bilgisayarına zararlı yazılımı yükleyebilir. Bu yazılım, şirketin ağındaki verilere erişim sağlar ve saldırganın şirketin iç sistemlerine sızmasına olanak tanımaktadır.*

- *Hedefe Özel İçerik:* Saldırgan, kişinin üzerinde çalıştığı projeler, görevler ve şirket içindeki konumu hakkında bilgi sahibi olduğundan, e-posta içeriği bu bilgilere dayalı olarak tasarlanır.
- Örneğin, "Son mali anaiz raporları üzerine yapılacak denetim için gereken belgelerinizi incelememiz gerekiyor" şeklinde bir ifade, hedefin dikkatini çekebilir.
- *Profesyonel Dil Kullanımı:* E-posta, profesyonel bir dil ile yazılır ve şirkete özgü terminoloji kullanılır. Bu, mesajın ciddiyetini artırır ve hedefin e-postayı dikkate almasını sağlar. E-posta, açık, net ve doğrudan bir üslupla yazılarak gerçekçi görünmesi sağlanmaktadır.

2.4. Saldırı Sonuçları

E-posta açıldıktan ve zararlı yazılım bilgisayara yüklendikten sonra, saldırının sonuçları hızlı bir şekilde ortaya çıkmaktadır. Bu aşama, hem kullanıcının kişisel güvenliğini hem de şirketin siber güvenliğini ciddi şekilde tehdit etmektedir.

2.4.1. Veri Hırsızlığı

Saldırgan, kişinin bilgisayarına erişim sağladıktan sonra, şirketin hassas verilerine ulaşabilmektedir.

3. ***Hassas Bilgilere Erişim:*** Saldırgan, kişinin bilgisayarındaki **k**ritik dosyalara erişerek, şirketin mali kayıtları**,** müşteri bilgileri **v**e diğer gizli veriler üzerinde işlem yapabilir. Bu tür kritik bilgiler, şirketin rekabet avantajını zayıflatabilir veya kötü niyetli üçüncü şahıslara satılabilir.
4. ***Veri İhlali:*** Çalınan veriler, üçüncü şahıslarla paylaşılabilir**. B**u, yalnızca şirketin güvenliğini değil, aynı zamanda müşterilerin **kişisel verilerini** de tehlikeye atar. Müşteri bilgileri kötüye kullanıldığında, şirket ciddi itibar kaybı yaşayabilir ve yasal sorunlarla karşılaşabilir**.**

4.1.1. Kurumsal İtibar Kaybı

Saldırganın erişimi, şirketin siber güvenlik açığını ortaya çıkarır ve bu durum, kurumsal itibara ciddi zararlar verebilmektedir.

- ***Müşteri Güveni:*** Veri ihlali, şirketin güvenliği konusunda müşteri güvenini sarsar**.** Müşteriler, kişisel ve finansal bilgilerini emanet ettikleri şirketin güvenliğine olan inançlarını kaybedebilir. Bu da doğrudan müşteri kaybına yol açabilmektedir.
- ***Hukuki Sonuçlar:*** Veri ihlali**,** özellikle müşteri bilgilerini koruma yükümlülüğü olan şirketleri yasal süreçlerle karşı karşıya bırakabilir. Bu durum, **c**ezalar**,** hukuki giderler **ve** tazminat davaları gibi ciddi sonuçlar doğurabilmektedir.

4.1.2. Maddi Kayıplar

Saldırganın sistemlere erişimi, şirketin maddi kayıplarına yol açabilir. Ayrıca, **s**ızdırılan veriler yasal süreçleri başlatabilir.

- ***Finansal Zararlara Yol Açma:*** **Çalınan müşteri bilgileri** ve **şirket verileri**, doğrudan **mali kayıplara** neden olabilir. Özellikle, sızdırılan finansal bilgilerle yapılan dolandırıcılık işlemleri, şirketin **itibarını** zedeleyebilir ve **tazminat taleplerine** yol açabilir.
- ***Yeniden Yapılanma Maliyetleri:*** Saldırı sonrası şirket, **güvenlik altyapısını** yeniden yapılandırmak zorunda kalabilir. Bu süreç, ek maliyetler ve önemli **zaman kaybına** yol açmaktadır. Ayrıca, güvenlik açıklarını kapatmak için yapılan harcamalar, şirketin bütçesini zorlayabilir.

4.1.3. Şirket İçindeki Aksaklıklar

Zararlı yazılımın yayılması, şirketin **iç işleyişinde aksamalara** neden olabilir.

Örneğin:

- ***Çalışan Verimliliği Düşer:*** Kötü amaçlı yazılımlar, bilgisayarların veya ağların **yavaşlamasına** veya **çökmesine** neden olabilir, bu da çalışanların verimliliğini ciddi şekilde düşürür.
- ***İş Sürekliliği Tehdit Altında:*** Bilgisayarların veya sunucuların ele geçirilmesi, şirketin **iş sürekliliğini** tehlikeye atabilir. Bu da, operasyonel aksaklıklar ve gelir kayıplarına yol açabilir.

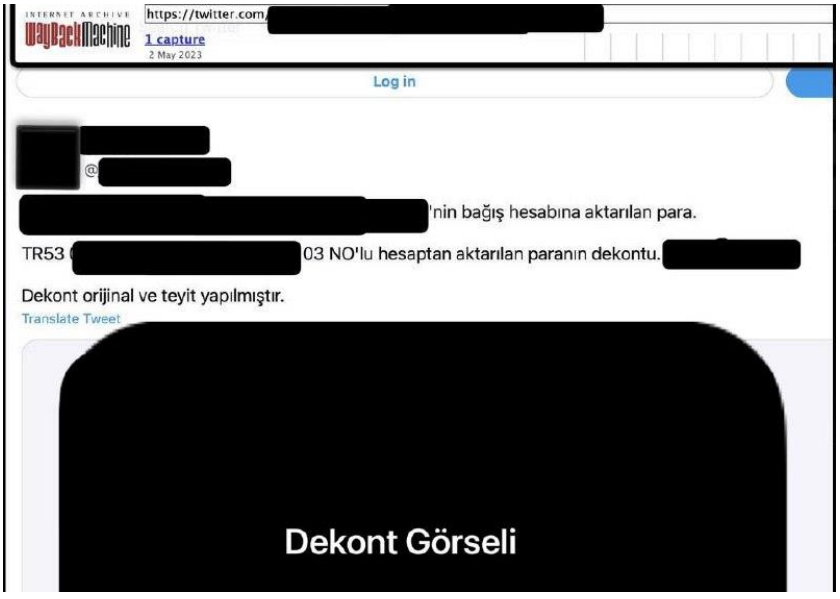
5. UYGULAMA

Çalışmanın bir önceki bölümlerinde anlatılan spearing phishing saldırı aşamaları gerçek hayatta örnek bir senaryo üzerinden gerçekleştirilmiştir. Örnek senaryo eğitim ve farkındalık oluşturmak amacıyla gerçekleştirilmiştir. Aksi takdirde yapılan bu saldırının olası hukuki yaptırımlarının varlığı unutulmamalıdır.

Uygulamanın gerçekleştirildiği senaryoda ki kişi "x" adında bir iş insanıdır. X kişisinin sosyal medya hesapları ve halka açık profilleri üzerinden detaylı bir sosyal mühendislik araştırması gerçekleştirilmiştir. Bu süreçte çeşitli online kaynaklardan ve sızdırılmış verilerden yararlanarak x kişisi hakkında kapsamlı bir bilgi toplanmıştır. Bilginin elde edilmesinde öncelik sosyal medya hesapları olmuştur.

5.1. Saldırı Aşamaları

Saldırı senaryosu gereği x adlı kişinin sosyal medya hesabında paylaşıp sildiği bağış içeriği internet arşivi sayfası kullanılarak elde edilmiştir. İçerik olarak kişiye ait banka dekont bilgilerine Şekil 3'te verilen görsel ile ulaşılmıştır. İlgili görseldeki kişisel veriler veri gizliliği sebebiyle karartılmıştır.



Şekil 3. İnternet arşivi içerisinden veri elde edilmesi

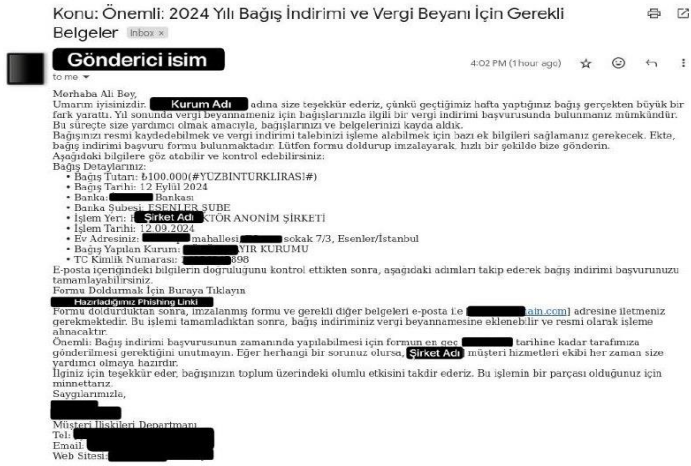
Şekil 4'te dekontta yer alan bilgiler dikkatlice analiz edilmiş banka hesap numarası, işlem tutarı ve işlem tarihi gibi önemli veriler analiz edilmiştir.



Şekil 4. Saldırganın finansal bilgileri elde etmesi

X adlı kişinin bir ödeme dekontunun elde edilmesi ile başlayan saldırı sonucu mesai saatleri içinde kullanıcı için sahte bir "2024 yılı bağış indirimi ve vergi beyanı" konulu oltalama e-postası hazırlanmıştır.

E-posta içerisine gizlenmiş zararlı bir bağlantı eklenerek oltalama saldırısı için kullanıcı X'in görsele ve bağlantıya tıklaması sağlanmıştır. Şekil 5.'te senaryo gereği e-posta kullanıcı X'e gönderilmiştir.



Şekil 5. Oltalama amaçlı oluşturulan e-posta örneği

Oltalama e-posta örneği sonrasında ileti içerisindeki bağlantıya tıklayan "x" adlı kullanıcının IP adresi, siteye erişim hesap bilgileri ve parola bilgileri saldırgan tarafından senaryo gereği ele geçirilmiştir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Spear phishing saldırılarının bu çalışmada ciddi sonuçlar doğurabileceği ifade edilmiştir. Detaylı olarak bilgi toplama ile kişisel taktiklerle gerçekleştirilen bu tür saldırıların oluşturulma aşamalarına çalışmada yer verilniş olup, senaryo gereği oluşturulan e-posta içeriğinin tıklama eylemi sonrası olası zararları verilmiştir.

Spear phishing saldırılarından korunmak için şirketlerin öncelikle sağlam bir siber güvenlik altyapısı kurmaları gereklidir. Çalışanların siber güvenlik tehditleri konusunda düzenli eğitim alması, saldırılara karşı erken uyarı sistemlerinin devreye alınması ve şüpheli e-postalar konusunda dikkatli olunması kritik öneme sahiptir.

Ayrıca, kişisel ve profesyonel bilgilerin paylaşımında daha dikkatli olunmalı ve şirket içindeki hassas verilere yalnızca yetkili kişilerin erişmesi sağlanmalıdır. Saldırı sonrasında ise, şüpheli faaliyetlerin hızlıca raporlanması, etkilenmiş sistemlerin izole edilmesi ve güvenlik önlemlerinin güçlendirilmesi gereklidir. Bu tür tedbirler, potansiyel zararları en aza indirirken, saldırıların başarı şansını da büyük ölçüde azaltmaktadır. Güçlü bir savunma oluşturmak ve bu tür tehditlere karşı hazırlıklı olmak, organizasyonların siber güvenliğini sürdürülebilir kılmaktadır.

7. KAYNAKÇA

Chargo, M. (2018). You've been hacked: How to better incentivize corporations to protect consumers' data. *Transactions: Tennessee Journal of Business Law, 20*, 115–143.

IBM. (2023). *X-Force threat intelligence index.* Retrieved from https://secure-iss.com/wp-content/uploads/2023/02/IBM-Security-X-Force-Threat-Intelligence-Index-2023.pdf

Kalnin, S., Purin, S., & Alksnis, G. (2017). Security evaluation of wireless network access points. *Applied Computer Systems, 21*(1), 38–45. https://doi.org/10.1515/acss-2017-0011

Koyun, A., & Aljanaby, E. (2017). Social engineering attacks. *Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology, 4*(1), 1–6.

Pavković, N., & Perkov, L. (2011). Social engineering toolkit—A systematic approach to social engineering. In *Proceedings of the 34th IEEE International Convention MIPRO* (pp. 1485–1489). Opatija, Croatia: IEEE.

Proofpoint. (2023). *Human factor report.* Retrieved from https://www.proofpoint.com/us/resources/threat-reports/human-factor

Salahdine, F., & Kaabouch, N. (2019). Social engineering attacks: A survey. *Future Internet, 11*(4), 89. https://doi.org/10.3390/fi11040089

Verizon. (2024). *Data breach investigations report.* Retrieved from https://www.verizon.com/business/resources/reports/dbir/

Xiangyu, L., Qiuyang, L., & Chandel, S. (2017). Social engineering and insider threats. In *Proceedings of the International Conference on Cyber-Enabled Distributed Computing and Knowledge Discovery* (pp. 25–34). Nanjing, China: IEEE.

Yeboah-Boateng, E. O., & Amanor, P. M. (2014). Phishing, SMiShing & Vishing: An assessment of threats against mobile devices. *Journal of Emerging Trends in Computing and Information Sciences, 5*(4), 297–307.

BÖLÜM 47

Enerji Simülasyonu İle Butik Otel Tasarımı Marmaris İçin Optimum Çözüm

Hazal Boydak Demir[1] Figen Balo[2]

[1] Arş. Gör., Dicle Üniversitesi Mimarlık Fakültesi, 0000-0002-1188-4732
[2] Prof. Dr., Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, 0000-0001-5886-730X

Giriş

Enerji tüketimi ve sera gazı emisyonundaki artış, yaşam kalitesinin artması, nüfus artışı küresel bazda çevreye zarar vermektedir. Uluslararası Enerji Ajansı'na göre enerji tüketiminin %36'sı ve CO_2 tüketiminin ise %37'si bina inşaatına harcanmaktadır [1]. İklim değişikliği ile mücadele ve enerji tasarrufu için inşaat sektöründe önemli adımlar atılması gerekmektedir. Yüksek enerji ihtiyacına sebebiyet veren konfor koşulları ve artan kentleşme ışığında binalardaki iç iklim yetersizliklerini dikkate almak önemli hale gelmiştir [2],[3]. Bu sebeple enerji tüketimini tahmin edebilen modeller, bina performansını arttırmayı ve bina enerji tüketimini azaltmayı sağlayan araçlardır [4]. Binalardaki enerji tüketimi bina enerji simülasyon yöntemi ile analiz edilmektedir.

Bina enerji simülasyonu (BES), ve bina enerji modellemesi bir binanın dijital ortamda modelinin oluşturulması ve herhangi bir enerji simülasyon programında simülasyonunun yapılması sürecini tanımlamaktadır. BES 1960'lardan beri kullanılan bir terimdir [5]. Fakat halen yapıların planlama ve tasarım süreçlerine tam olarak entegre edilememiştir. Bu sebeple erken tasarım aşamasında enerji etkin tasarım parametreleri iyi bir şekilde uygulanmamaktadır [6]. BES kullanımında bina enerji modelindeki (BEM) bilgilerin manuel olarak eklenmesi zaman, maliyet ve emek açısından zor olmaktadır. Bu nedenle son zamanlarda BIM'den BES yaklaşımı gelişmeye başlamıştır [7],[8].

Enerji modellemelerinde binanın geometrisini oluşturma en fazla vakit alan işlemdir. Fakat BIM'den BEM'e yaklaşımı bu sorunun çözümünde önemli bir adımdır. Bu çalışmadaki temel amaçlardan biri de BIM'den BES'e yaklaşımı ile örnek bir model üzerinden enerji analizi yapmaktır. Bu süreçte, binanın enerji simülasyon modelini oluşturmak için gerekli zaman azalır. Ayrıca tasarım için hızlı alternatif üretme olanağı artar. Bununla birlikte bu süreçle birlikte BES'in doğruluğu artar ve geleneksel tasarım sürecine göre daha düşük enerji tüketimi gösteren bina modeli üretilir. BIM yani bina bilgi modellemesi, binaların üç boyutlu grafiksel modellerinden oluşmaktadır. Ayrıca BIM bir binaya ilişkin geometri, bileşenler, özellikler gibi tüm bilgileri içermektedir [9]. İnşaat sektörü de günden güne geleneksel 2 boyutlu çizimden uzaklaşarak BIM'e doğru yönelmektedir [10].

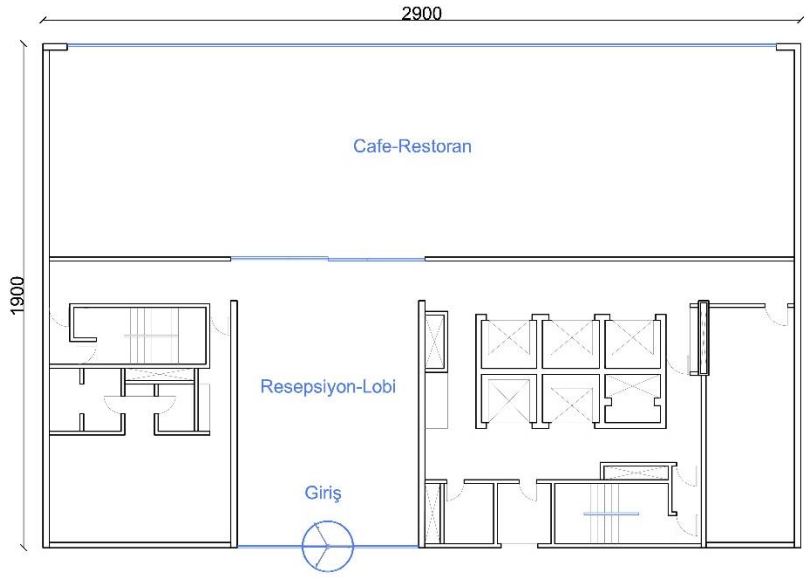
Bu çalışmada ise BIM tabanlı Autodesk Revit programı üzerinden örnek model yapılmıştır. Modele ait bilgiler tamamlandıktan sonra farklı yöresel taşlar ve köpük yalıtım malzemeleri ile oluşturulan alternatifler programa girilmiştir. Daha

sonra BIM'den BES'e geçişte kullanılan gbXML formatı kullanılarak Autodesk Green Building Studio ile enerji analizleri yapımıştır.

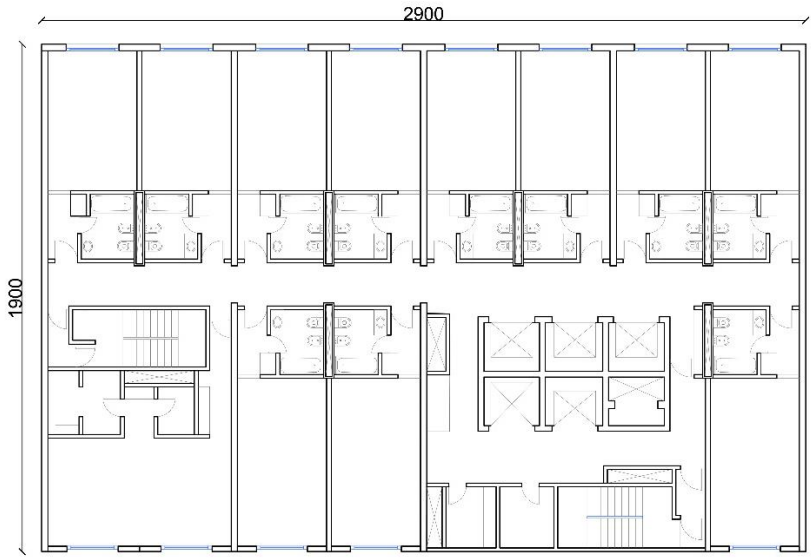
Materyal Metod

Küresel çapta büyük bir sorun haline gelen enerji kavramı enerji bakımından dışa bağımlı olan ülkemiz için de sorun teşkil etmektedir. Bu durum minimum enerji tüketen, doğal ve sürdürülebilir yapı malzemeleri kullanan tasarımların oluşmasını sağlamıştır.

Bu çalışmada Muğla ili Marmaris ilçesinde bir butik otel tasarlanmıştır. Tasarlanan butik otel yapısına ait kat planları Şekil 1. ve Şekil 2.'de verilmiştir.



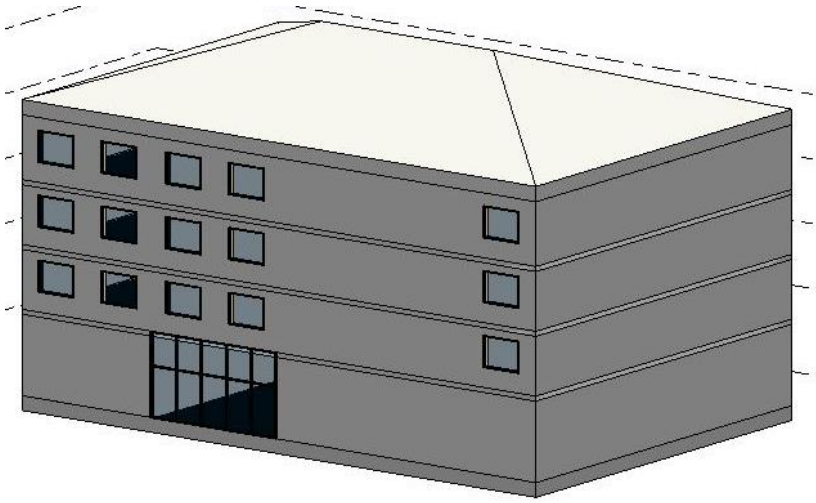
Şekil 1: Butik otel zemin kat planı



Şekil 2: Butik otel 1.,2.,3. kat planı

Çalışma kapsamında tasarlanan butik otel yapısı için bölgenin iklim özellikleri dikkate alınarak alternatifler oluşturulmuştur. Çalışmada Muğla ili Marmaris ilçesi (sıcak-nemli) yapının konumu olarak belirlenmiştir. Sıcak-nemli iklim özellikleri olarak yüksek sıcaklık, nem ve yoğun yağış görülmektedir. Kış ayları yağışlı geçerken, yaz ayları ile olan sıcaklık farkı ise azdır. Hakim rüzgar ve hava akım özellikleri istenen seviyededir [11].

Çalışmanın üç boyutlu modellenmesinde kullanılan program olan Autodesk Revit yazılımı Bina Bilgi Modelleme (BIM) tabanlı çalışmaktadır. BIM yapının üç boyutlu modelleme, tasarım ve dokümantasyon gibi tüm aşamalarında kullanılabilmektedir. Bu çalışmada örnek butik otel yapısı BIM tabanlı Autodesk Revit yapısında modellenerek binaya ait tüm bilgiler programda girilmiştir. Butik otel yapısı modeli Şekil 3.'de verilmiştir.



Şekil 3: Butik otel yapısı modeli

Çalışmada ilk parametre olan duvar yapı malzemesi için yöresel taşlar kullanılmıştır. Bunlar; sorkun taşı, seyidler taşı, kızılören taşı, kazım karabekir taşıdır. Ayrıca çalışmada bir diğer parametre olarak duvar yalıtım malzemesi belirlenmiştir. Duvar yalıtım malzemesi olarak; EPS köpük, poliüretan rijit köpük, üretan köpük alternatifleri kullanılmıştır. Çalışma kapsamında çatı türü olarak kırma kiremit çatı kullanılmıştır. Bu malzemelerin dıştan yalıtımlı ve sandviç duvar olarak uygulanması sonucunda 24 alternatif elde edilmiştir. Bu alternatifler Tablo 1.'de verilmiştir.

Tablo 1: Butik otel yapısı için belirlenen alternatifler

Tip	Dış Duvar (İçten - Dışa(cm))						
Tip-1	Boya (0.10)	Sıva (2.00)	Sorkun taşı (20.00)		EPS köpük (5.00)	Sıva (2.00)	Boya (0.10)
Tip-2	Boya (0.10)	Sıva (2.00)	Seyidler taşı (20.00)		EPS köpük (5.00)	Sıva (2.00)	Boya (0.10)
Tip-3	Boya (0.10)	Sıva (2.00)	Kızılören taşı (20.00)		EPS köpük (5.00)	Sıva (2.00)	Boya (0.10)
Tip-4	Boya (0.10)	Sıva (2.00)	Kazım karabekir taşı (20.00)		EPS köpük (5.00)	Sıva (2.00)	Boya (0.10)
Tip-5	Boya (0.10)	Sıva (2.00)	Sorkun taşı (20.00)		Poliüretan rijit köpük (5.00)	Sıva (2.00)	Boya (0.10)
Tip-6	Boya (0.10)	Sıva (2.00)	Seyidler taşı (20.00)		Poliüretan rijit köpük (5.00)	Sıva (2.00)	Boya (0.10)
Tip-7	Boya (0.10)	Sıva (2.00)	Kızılören taşı (20.00)		Poliüretan rijit köpük (5.00)	Sıva (2.00)	Boya (0.10)
Tip-8	Boya (0.10)	Sıva (2.00)	Kazım karabekir taşı (20.00)		Poliüretan rijit köpük (5.00)	Sıva (2.00)	Boya (0.10)
Tip-9	Boya (0.10)	Sıva (2.00)	Sorkun taşı (20.00)		Üretan köpük (5.00)	Sıva (2.00)	Boya (0.10)
Tip-10	Boya (0.10)	Sıva (2.00)	Seyidler taşı (20.00)		Üretan köpük (5.00)	Sıva (2.00)	Boya (0.10)
Tip-11	Boya (0.10)	Sıva (2.00)	Kızılören taşı (20.00)		Üretan köpük (5.00)	Sıva (2.00)	Boya (0.10)
Tip-12	Boya (0.10)	Sıva (2.00)	Kazım karabekir taşı (20.00)		Üretan köpük (5.00)	Sıva (2.00)	Boya (0.10)
Tip-13	Boya (0.10)	Sıva (2.00)	Sorkun taşı (10.00)	EPS köpük (5.00)	Sorkun taşı (10.00)	Sıva (2.00)	Boya (0.10)
Tip-14	Boya (0.10)	Sıva (2.00)	Seyidler taşı (10.00)	EPS köpük (5.00)	Seyidler taşı (10.00)	Sıva (2.00)	Boya (0.10)
Tip-15	Boya (0.10)	Sıva (2.00)	Kızılören taşı (10.00)	EPS köpük (5.00)	Kızılören taşı (10.00)	Sıva (2.00)	Boya (0.10)
Tip-16	Boya (0.10)	Sıva (2.00)	Kazım karabekir taşı (10.00)	EPS köpük (5.00)	Kazım karabekir taşı (10.00)	Sıva (2.00)	Boya (0.10)
Tip-17	Boya (0.10)	Sıva (2.00)	Sorkun taşı (10.00)	Poliüretan rijit köpük (5.00)	Sorkun taşı (10.00)	Sıva (2.00)	Boya (0.10)
Tip-18	Boya (0.10)	Sıva (2.00)	Seyidler taşı (10.00)	Poliüretan rijit köpük (5.00)	Seyidler taşı (10.00)	Sıva (2.00)	Boya (0.10)
Tip-19	Boya (0.10)	Sıva (2.00)	Kızılören taşı (10.00)	Poliüretan rijit köpük (5.00)	Kızılören taşı (10.00)	Sıva (2.00)	Boya (0.10)
Tip-20	Boya (0.10)	Sıva (2.00)	Kazım karabekir taşı (10.00)	Poliüretan rijit köpük (5.00)	Kazım karabekir taşı (10.00)	Sıva (2.00)	Boya (0.10)

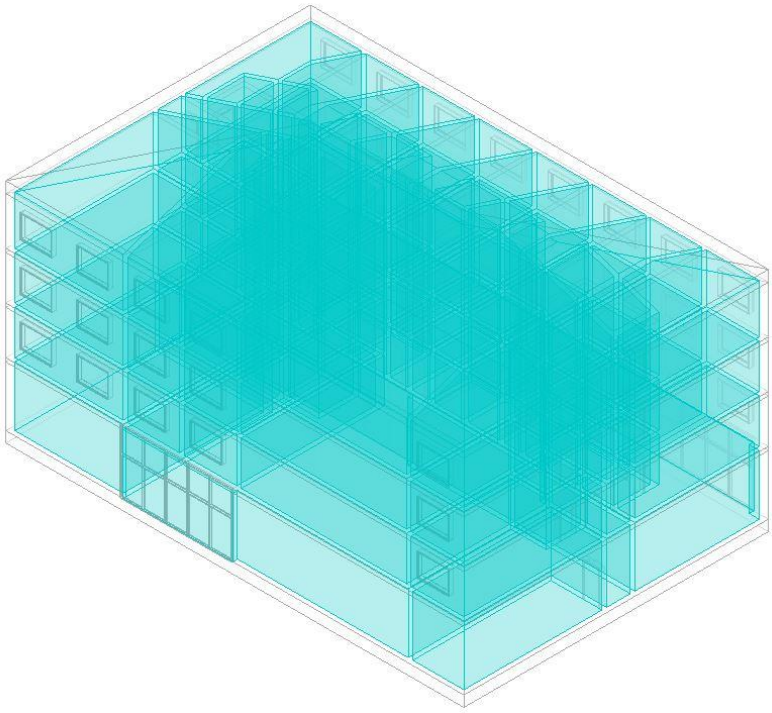
Tip-21	Boya (0.10)	Sıva (2.00)	Sorkun taşı (10.00)	Üretan köpük (5.00)	Sorkun taşı (10.00)	Sıva (2.00)	Boya (0.10)
Tip-22	Boya (0.10)	Sıva (2.00)	Seyidler taşı (10.00)	Üretan köpük (5.00)	Seyidler taşı (10.00)	Sıva (2.00)	Boya (0.10)
Tip-23	Boya (0.10)	Sıva (2.00)	Kızılören taşı (10.00)	Üretan köpük (5.00)	Kızılören taşı (10.00)	Sıva (2.00)	Boya (0.10)
Tip-24	Boya (0.10)	Sıva (2.00)	Kazım karabekir taşı (10.00)	Üretan köpük (5.00)	Kazım karabekir taşı (10.00)	Sıva (2.00)	Boya (0.10)

Bu alternatiflerin oluşturulmasında kullanılan malzemelerin termal değerleri Tablo 2.'de verilmiştir [12].

Tablo 21: Butik otel yapısı için kullanılan malzemelerin termal özellikleri

Malzeme	Isı İletkenlik Katsayısı (W/m.K)	Yoğunluk (kg/m^3)
Sorkun taşı	0,84	2450
Seyidler taşı	0,52	1400
Kızılören taşı	0,47	1860
Kazım Karabekir taşı	0,63	30
EPS köpük	0,0375	150
Poliüretan rijit köpük	0,032	30
Üretan köpük	0,027	60

Çalışma kapsamında planlanan butik otel yapısı için alternatifler oluşturulduktan sonra her bir alternatif için enerji modelleri yine Autodesk Revit programında yapılmıştır. Enerji modeli Şekil 4.'de verilmiştir.

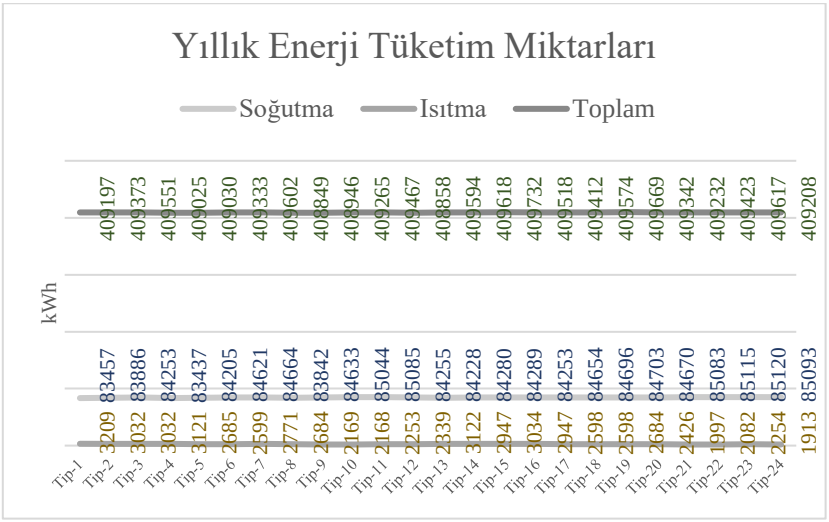


Şekil 4: Butik otel yapısı enerji modeli

Bir sonraki aşamada ise oluşturulan enerji modelleri gbXML formatında kaydedilerek Autodesk Green Building Studio programına aktarılmıştır. Bu durum BIM'den BES'e geçişe örnek teşkil etmektedir. GBS programı ile enerji analizleri yapılarak yıllık enerji tüketimleri elde edilmiştir.

Bulgular ve Sonuç

Bu çalışma kapsamında Muğla ili Marmaris ilçesinde butik otel tasarlanmıştır. Daha sonra butik otel için yöresel taş malzemeler ve farklı yalıtım malzemeleri ile alternatifler oluşturularak enerji analizleri yapılmıştır. Çalışmada asıl amaç Marmaris ilçesi (sıcak-nemli) iklimine en uygun alternatifi belirlemektir. Bu amaçla yapılan analizlerin yıllık enerji tüketim sonuçları Şekil 5.'de verilmiştir.



Şekil 5: Butik otel yapısı yıllık enerji tüketimleri

Butik otel yapısı alternatifleri için enerji analiz sonuçları yıllık bazda incelendiğinde soğutma enerjisi tüketiminde dıştan yalıtımlı duvarın sandviç duvara göre Marmaris ilçesi ikliminde daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Bununla birlikte yıllık soğutma enerjisi tüketimi için taş yapı malzemeleri karşılaştırıldığında; dıştan yalıtımlı duvar türünde kazım karabekir taşının en az enerji tükettiği daha sonra ise sorkun taşı, seyidler taşı ve kızılören taşının geldiği görülmüştür. Fakat soğutma enerjisi tüketimi için sandviç duvar türünde bu sıralama; sorkun taşı, kazım karabekir taşı, seyidler taşı ve kızılören taşı sıralamasında olmuştur. Yalıtım malzemesi için soğutma enerjisi karşılaştırıldığında ise; her iki duvar uygulama türü için EPS köpük en az enerji harcarken poliüretan rijit köpük ve üretan köpük sıralaması elde edilmiştir.

Analiz sonuçları yıllık ısıtma enerjisi harcamaları için karşılaştırıldığında; sandviç duvar türünün dıştan yalıtımlı duvara kıyasla daha az enerji harcadığı saptanmıştır. Yıllık ısıtma enerjisi tüketimi yöresel taş yapı malzemesi için incelendiğinde; her bir yalıtım türü için farklı sıralamalar elde edildiğinden kesin bir sıralama elde edilememiştir. Yalıtım malzemesi bakımından yıllık ısıtma enerjisi tüketimi incelendiğinde ise; hem dıştan yalıtımlı duvar hem de sandviç duvar türü için az enerji tüketenden çok enerji tüketene doğru sıralama üretan köpük, poliüretan rijit köpük, EPS köpük şeklinde olmuştur.

Elde edilen analiz sonuçları yıllık toplam enerji tüketimi açısından karşılaştırıldığında; toplam enerji tüketiminin genel olarak soğutma enerjisine paralel sonuç verdiği gözlemlenmiştir. Bu duruma Marmaris ilçesinin soğutma öncelikli bir iklime sahip olması neden olmaktadır. Yıllık toplam enerji tüketimi için dıştan

yalıtımlı duvar sandviç duvara göre daha iyi sonuç vermiştir. Yıllık toplam enerji tüketimi için taş yapı malzemeleri karşılaştırıldığında her iki duvar uygulama türü için kazım karabekir taşının en az enerji tükettiği daha sonra ise sorkun taşı, seyidler taşı ve kızılören taşının geldiği saptanmıştır. Analiz sonuçları yalıtım malzemeleri için incelendiğinde toplam enerji tüketimi için sıralama bu kez ısıtma enerjisine paralel şekilde her iki duvar uygulama türü içinde üretan köpük, poliüretan rijit köpük, EPS köpük sırasında olmuştur.

Yıllık enerji tüketim sonuçları soğutma, ısıtma ve toplam enerji tüketimi için incelendiğinde; en az enerji tüketen ve en çok enerji tüketen alternatifler arasında; soğutma enerjisi tüketiminde %1.97, ısıtma enerjisi tüketiminde %40,39, toplam enerji tüketiminde %0,21 enerji tasarrufu elde edilmiştir.

Bu çalışma ile belirlenen yerel taş yapı malzemeleri temel olmak üzere yalıtım malzemeleri ve duvar birleşim türleri karşılaştırılarak Muğla ili Marmaris ilçesi için en uygun parametreler belirlenmiştir. Bu sonuçlar neticesinde Marmaris ilçesinde yapılacak bir otel yapısı için referans olması hedeflenmiştir. Bu çalışmanın tasarımcılara, yapı üreticilerine yol göstermesi amaçlanmıştır.

KAYNAKLAR

[1] G.A.f. Buildings, I.E.A. Construction, t.U.N.E. Programme, 2019 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-Emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector, United Nations Environment Programme Nairobi, Kenya, 2019.

[2] U. Al-mulali, Factors affecting CO2 emission in the Middle East: A panel data analysis, Energy 44 (1) (2012) 564–569, https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.05.045.

[3] C. Wang, M. Ferrando, F. Causone, X. Jin, X. Zhou, X. Shi, Data acquisition for urban building energy modeling: A review, Build. Environ. 217 (2022) 109056, https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109056.

[4] Y. Zhou, S. Zheng, Machine-learning based hybrid demand-side controller for high-rise office buildings with high energy flexibilities, Appl. Energy 262 (2020) 114416, https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114416.

[5] Fiske VP, Mane MSJ, Bhonde CBK. Energy simulation in buildings. Int J Eng Res Technol July 2014;3(7). https://doi.org/10.17577/IJERTV3IS070585.

[6] Gao H, Koch C, Wu Y. Building information modelling based building energy modelling: a review. Appl Energy March 2019;238:320–43. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.032.

[7] Elagiry M, Charbel N, Bourreau P, De Angelis E, Costa A. 'copy IFC to Building Energy Performance Simulation: a systematic review of the main adopted tools and approaches'. September 2020.

[8] O'Donnell JT, et al. Transforming BIM to BEM: generation of building geometry for the NASA ames sustainability base BIM. Lawrence Berkeley National Lab; 2013. https://doi.org/10.2172/1168736. LBNL-6033E, January.

[9] Migilinskas D, Popov V, Juocevicius V, Ustinovichius L. The benefits, obstacles and problems of practical bim implementation. Procedia Eng January 2013;57:767–74. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.04.097.

[10] Arayici Y, Coates P, Koskela L, Kagioglou M, Usher C, O'Reilly K. Technology adoption in the BIM implementation for lean architectural practice. Autom ConStruct March 2011;20(2):189–95. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2010.09.016.

[11] Ovalı, P. K. (2019). Biyoklimatik Tasarim Matrisi (Türkiye). Trakya Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 20(2), 51-66.

[12] Kaya, A. (2020). THERMAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF BUILDING STONES IN AFYON AND KARAMAN REGION. Bartın University International Journal of Natural and Applied Sciences, 3(1), 46-51.

.



Zemin Sıvılaşması: Mekanizması, Risk Değerlendirmesi ve Önleme Yöntemleri

***Mehmet Hayrullah Akyıldız*[1]**

[1] Dr. Öğretim Üyesi,Dicle Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, ORCID: 0000-0001-7239-3518

1. Giriş

Zemin sıvılaşması, doygun ve kohezyonsuz zeminlerin, genellikle depremler sırasında sarsıntıya maruz kaldığında taşıyıcı özelliklerini kaybederek sıvı gibi davranması durumudur. İlk olarak Casagrande (1936) tarafından tanımlanan sıvılaşma olgusu, yer bilimleri ve geoteknik mühendisliği alanında önemli bir araştırma konusu olmuştur. Özellikle depremlerin yıkıcı etkilerinin yoğun olduğu bölgelerde sıvılaşma, ciddi yapısal hasarlar ve can kayıplarına neden olabilmektedir (Seed & Idriss, 1971).

Sıvılaşma olayı, zemin taneleri arasındaki boşluklarda bulunan su basıncının ani bir şekilde artması ve bunun sonucunda efektif gerilmenin sıfıra yaklaşmasıyla meydana gelir. Bu durum, zeminlerin taşıma kapasitelerini kaybetmesine ve yerleşim, çökme veya yan yanal hareketler gibi tehlikeli etkilerin oluşmasına yol açar (Ishihara, 1985). Türkiye gibi aktif tektonik bölgelerde, zemin sıvılaşması deprem kaynaklı hasarların en yaygın nedenlerinden biridir. Özellikle gevşek kumlu veya siltli zeminlerin bulunduğu alanlarda, sıvılaşma riski ciddi boyutlara ulaşmaktadır (Youd et al., 2001).

Zemin sıvılaşması, yalnızca teknik bir mühendislik problemi değil, aynı zamanda şehir planlama ve afet yönetimi açısından da büyük bir öneme sahiptir. Örneğin, 1999 Kocaeli Depremi sırasında Adapazarı bölgesinde yaşanan yaygın sıvılaşma olayları, yapıların tamamen yerle bir olmasına neden olmuş ve bu durum ülkemizde sıvılaşma araştırmalarının hız kazanmasına yol açmıştır (Gör et al., 2005). Dünya genelinde ise 1964 Alaska ve Niigata depremleri, sıvılaşmanın etkilerinin geniş çapta fark edilmesine öncülük etmiştir (Seed, 1979).

Son yıllarda sıvılaşma riskini değerlendirmek ve bu riskin önüne geçmek için pek çok teknolojik ve mühendislik çözümü geliştirilmiştir. Özellikle Standard Penetration Test (SPT) ve Cone Penetration Test (CPT) gibi jeoteknik yöntemlerle sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesi, risk haritalarının oluşturulması ve zemin iyileştirme tekniklerinin uygulanması, bu sorunun etkili bir şekilde yönetilmesini sağlamaktadır (Robertson & Wride, 1998).

Türkiye'de ve dünyada yakın zamanda yaşanan Kahramanmaraş (2023) ve İzmir (2020) depremleri, sıvılaşmanın yıkıcı etkilerinin güncel bir örneği olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu bağlamda, zemin sıvılaşmasının mekanizmasının daha iyi anlaşılması, risk değerlendirme süreçlerinin geliştirilmesi ve şehir planlaması ile yapılaşmada bu risklerin göz önünde bulundurulması bir zorunluluk haline gelmiştir.

2. Zemin Sıvılaşmasının Mekanizması

Zemin sıvılaşması, zemin taneleri arasındaki boşluklarda bulunan suyun basıncının ani artışı sonucunda, zemin tanelerinin birbiriyle olan temasının kaybolması ve zeminin sıvı gibi davranması ile meydana gelir. Bu durum özellikle doygun, kohezyonsuz ve gevşek zeminlerde gerçekleşir (Seed & Idriss, 1971). Sıvılaşma, zeminin efektif gerilmesini sıfıra indirerek taşıyıcı özelliğini kaybetmesine neden olur ve bu durum hem yapısal hasara hem de yüzey deformasyonlarına yol açar (Ishihara, 1985).

2.1 Fiziksel ve Jeoteknik Süreçler

Sıvılaşma mekanizması, temel olarak üç aşamada incelenebilir:

- **Başlangıç Etkileri:**Deprem sırasında meydana gelen ani ve şiddetli sarsıntılar, zemin tanelerini sıkıştırıcı bir kuvvet uygular. Bu sıkıştırıcı kuvvet, taneler arasındaki boşlukları azaltır ve boşluk suyunun basıncını artırır (Your et al., 2001).

- **Efektif Gerilmenin Azalması:**Boşluk suyu basıncının artmasıyla, zemin içindeki efektif gerilme azalır. Efektif gerilmenin sıfıra yaklaşması durumunda zemin, taşıma kapasitesini kaybederek sıvı gibi davranmaya başlar (Robertson & Wride, 1998).

- **Sonuçlar:**Bu süreç sonucunda zemin üzerinde bulunan yapılar eğilme, dönme, batma ya da devrilme gibi deformasyonlara uğrayabilir. Ayrıca zemin yüzeyinde kum fışkırmaları (sand boils) gibi sıvılaşma belirtileri de gözlemlenebilir (Seed, 1979).

2.2 Sıvılaşmayı Etkileyen Faktörler

Sıvılaşma mekanizmasının meydana gelmesinde bir dizi faktör etkilidir:

- **Zemin Türü:**Sıvılaşma genellikle düşük plastisiteli silt ve kum zeminlerde gözlemlenir. Bu tür zeminlerde tanelerin düzenlenişi ve kohezyon eksikliği sıvılaşma riskini artırır. Örneğin, kumlu zeminler, gevşek bir yapıdayken yüksek sıvılaşma potansiyeline sahiptir (Seed & Idriss, 1982).

- **Yeraltı Su Seviyesi:**Yeraltı suyunun sığ olduğu alanlarda, doygun zemin tabakaları daha yaygındır. Bu durum, sıvılaşma riskini artıran önemli bir etkendir (Ishihara, 1985).

- **Deprem Büyüklüğü ve Süresi:**Büyük ve uzun süreli depremler, zeminde daha fazla enerji birikimine ve bu nedenle daha yüksek sıvılaşma riskine neden olur. 1999 Kocaeli Depremi gibi uzun süreli depremlerde geniş çaplı sıvılaşma olayları görülmüştür (Gör et al., 2005).
- **Zemin Yoğunluğu ve Sıkılığı:**Gevşek zeminler, sıkı zeminlere kıyasla sıvılaşmaya daha yatkındır. Zemin sıkılığı, sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilmesinde önemli bir parametredir (Mitchell, 1976).
- **Topografya ve Jeolojik Yapı:**Alüvyonlu düzlükler ve nehir yatakları gibi düşük eğimli ve suya doygun alanlar, sıvılaşmaya daha yatkın alanlardır. Bu bölgelerde sıvılaşma riskinin değerlendirilmesi, özellikle şehir planlamasında kritik bir öneme sahiptir (Youd et al., 2001).

2.3 Sıvılaşmanın Sonuçları

Sıvılaşmanın etkileri genellikle yerleşim alanlarında gözle görülür ve ciddi yapısal hasarlara yol açar. Bu etkiler şunları içerir:

- **Yapı Çökmesi:**Zemin taşıma kapasitesini kaybettiğinde, yapıların temelleri stabilitesini kaybeder. Örneğin, Adapazarı'nda 1999 Kocaeli Depremi sırasında birçok bina bu nedenle çökmüştür (Gör et al., 2005).
- **Zemin Çökmesi ve Oturma:**Sıvılaşma sonrası, zemin yüzeyi çöker ve oturur. Bu durum özellikle altyapı tesislerini etkiler ve ciddi ekonomik kayıplara neden olabilir (Ishihara, 1985).
- **Kum Fışkırmaları:**Sıvılaşma sırasında zeminde meydana gelen basınç artışı, yüzeyde kum fışkırmalarına yol açar. Bu durum, hem zemin yüzeyinde hem de yapı temellerinde deformasyonlara neden olur (Seed, 1979).

2.4 Güncel Çalışmalar ve Yeni Perspektifler

Son yıllarda, sıvılaşma mekanizmasını daha iyi anlamak için yeni teknolojiler ve yöntemler geliştirilmiştir. Örneğin, gelişmiş CPT ve SPT analizleri ile sıvılaşma riski daha hassas bir şekilde belirlenebilmektedir (Robertson, 2010). Bunun yanı sıra, üç boyutlu zemin modelleme çalışmaları, sıvılaşmanın mekansal ve zamansal değişimlerini anlamada önemli bir araç olarak kullanılmaktadır.

3. Geçmiş Depremler ve Sıvılaşma Örnekleri

Sıvılaşma, tarih boyunca meydana gelen büyük depremlerde, özellikle alüvyonlu ve yeraltı suyuna doygun bölgelerde sıkça gözlemlenen bir zemin davranışıdır. Geçmişteki depremlerde sıvılaşmanın neden olduğu ciddi hasarlar, sıvılaşma mekanizmasının anlaşılmasına ve sıvılaşma önlemlerinin geliştirilmesine öncülük etmiştir.

3.1 Türkiye'den Örnekler

1999 Kocaeli (Marmara) Depremi:

Türkiye'nin en yıkıcı depremlerinden biri olan 1999 Kocaeli Depremi (Mw 7.4), sıvılaşma olaylarının yoğun bir şekilde gözlemlendiği bir felaketti. Özellikle Adapazarı ve çevresindeki alüvyon zeminlerde sıvılaşma nedeniyle binalarda devrilmeler, çökmeler ve temel kaymaları meydana geldi (Gör et al., 2005). Bu deprem sırasında yüzeyde kum fışkırmaları ve su birikintileri oluşmuş, sıvılaşmanın etkisi bariz bir şekilde gözlemlenmiştir.

2011 Van Depremi:

2011 yılında meydana gelen Van Depremi (Mw 7.1) sırasında, sıvılaşma belirtileri daha sınırlı olmakla birlikte, özellikle Erciş ilçesindeki yumuşak zeminlerde hasarlar rapor edilmiştir. Bu bölgelerdeki sıvılaşma, altyapı tesislerinde deformasyonlara ve zemin yüzeyinde oturmalara neden olmuştur (Bozkurt et al., 2012).

2023 Kahramanmaraş Depremleri:

Kahramanmaraş merkezli Şubat 2023 depremleri (Mw 7.7 ve 7.6), Türkiye'de geniş bir alanda ciddi etkiler yaratmıştır. Bu depremler sırasında Hatay, Adıyaman ve Malatya gibi şehirlerde sıvılaşma olayları bildirilmiştir. Özellikle Hatay'ın Amik Ovası gibi alüvyonlu bölgelerinde, yüzey deformasyonları ve altyapı hasarları dikkat çekmiştir. Ayrıca bu depremlerde sıvılaşmanın, yapıların temellerini zayıflatarak binaların çökmesine katkıda bulunduğu rapor edilmiştir (AFAD, 2023).

3.2 Dünyadan Örnekler

1964 Niigata Depremi (Japonya):

Mw 7.5 büyüklüğündeki Niigata Depremi, sıvılaşma fenomeninin geniş çapta gözlemlendiği ilk olaylardan biri olarak kabul edilir. Deprem sırasında, yoğun nüfuslu Niigata şehrinde birçok bina ve köprü sıvılaşma nedeniyle hasar görmüştür. Binaların temel kayması ve yana yatması, sıvılaşmanın etkilerini dramatik bir

şekilde ortaya koymuştur (Ishihara, 1985). Bu deprem, sıvılaşma mekanizmasının araştırılmasına yönelik birçok bilimsel çalışmanın başlangıcı olmuştur.

1989 Loma Prieta Depremi (ABD):

Mw 6.9 büyüklüğündeki bu deprem sırasında, Kaliforniya'nın bazı bölgelerinde sıvılaşma meydana gelmiştir. Özellikle San Francisco Körfez Bölgesi'ndeki yapay dolgulu alanlarda, zemin çökmesi ve oturmalar sonucunda ciddi altyapı hasarları rapor edilmiştir. Marina Bölgesi'nde sıvılaşma nedeniyle binaların devrilmesi ve gaz hatlarının hasar görmesi büyük yangınlara yol açmıştır (Seed et al., 1990).

2011 Christchurch Depremi (Yeni Zelanda):

Christchurch Depremi (Mw 6.3), sıvılaşma etkilerinin geniş çapta görüldüğü bir başka felakettir. Şehirdeki birçok bölgede kum fışkırmaları, zemin çökmeleri ve altyapı hasarları rapor edilmiştir. Özellikle sulak alanlar ve nehir kıyılarında, sıvılaşma etkisi nedeniyle yüzey deformasyonları dikkat çekmiştir. Bu olay, Yeni Zelanda'da sıvılaşma önlemlerinin şehir planlamasına entegre edilmesinde önemli bir dönüm noktası olmuştur (Cubrinovski et al., 2011).

3.3 Sıvılaşma ve Hasar Ölçekleri

Geçmiş depremlerden elde edilen bulgular, sıvılaşmanın etkisinin zeminin özelliklerine ve yapısal tasarıma bağlı olarak değiştiğini göstermektedir. Deprem büyüklüğü, yeraltı su seviyesinin derinliği ve zemin yoğunluğu gibi faktörler sıvılaşma etkisinin şiddetini belirlemede kritik rol oynar. Örneğin:

- Niigata Depremi'nde alüvyonlu zeminlerde hasar geniş bir alana yayılmıştır.
- Christchurch Depremi'nde, sulak alanlara yakın bölgeler sıvılaşmadan daha fazla etkilenmiştir.

3.4 Güncel Çalışmalar ve Teknolojik Yaklaşımlar

Günümüzde, geçmiş depremlerden elde edilen veriler, sıvılaşma riski değerlendirmelerinde önemli bir rehber olarak kullanılmaktadır. Örneğin, 3D zemin modelleme, sıvılaşma etkilerinin mekansal dağılımını anlamada kritik bir araçtır (Youd et al., 2001). Ayrıca, gelişmiş CPT ve SPT teknikleri, geçmiş sıvılaşma olaylarından elde edilen verilerle kalibre edilerek daha hassas risk değerlendirmelerine olanak sağlamaktadır (Robertson & Wride, 1998).

4. Sıvılaşma Potansiyelinin Değerlendirilmesi

Bir bölgedeki sıvılaşma riskinin doğru bir şekilde değerlendirilmesi, sıvılaşmaya yatkın zeminlerin tespit edilmesi ve bu riskin etkilerini en aza indirecek önlemlerin alınması için kritik bir adımdır. Bu değerlendirme, arazi ve laboratuvar çalışmalarının yanı sıra teorik ve ampirik analiz yöntemlerini de kapsar.

4.1 Arazi ve Laboratuvar Çalışmaları

Arazi Çalışmaları

Sıvılaşma potansiyelinin yerinde tespiti için en yaygın kullanılan yöntemler Standart Penetrasyon Testi (SPT) ve Konik Penetrasyon Testi (CPT) gibi zemin penetrasyon testleridir:

- **Standart Penetrasyon Testi (SPT):**SPT, bir sondaj deliği boyunca zeminin direncini ölçmek için kullanılan bir testtir. Test sırasında, zemine belirli bir ağırlıkla darbeler uygulanır ve bir tüpün zemine ne kadar battığı ölçülür. Darbe sayısı (N değeri), zeminin sıkılığı ve sıvılaşma direnci hakkında bilgi verir (Seed & Idriss, 1971). Özellikle SPT sonuçlarına dayanan ampirik sıvılaşma eğrileri, sıvılaşma potansiyelinin hızlı bir şekilde değerlendirilmesini sağlar.

- **Konik Penetrasyon Testi (CPT):**CPT, zemine sürekli bir şekilde bir koni yerleştirilerek zemin direncini ölçen bir testtir. CPT, SPT'ye kıyasla daha hassas ve sürekli veri sağladığı için sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilmesinde sıklıkla tercih edilir (Robertson & Wride, 1998). CPT verileri, zemin yoğunluğu, yeraltı su seviyesi ve sıvılaşmaya duyarlı zemin tabakalarının yerlerini belirlemede kritik bir rol oynar.

Laboratuvar Çalışmaları

Laboratuvar ortamında gerçekleştirilen testler, arazi çalışmalarıyla elde edilen verilerin desteklenmesini sağlar:

- **Zemin Granülometrisi ve Mineralojisi:**Zeminin tane boyutu dağılımı, sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilmesinde önemli bir parametredir. Özellikle, siltti ve kumlu zeminler sıvılaşmaya daha yatkındır (Ishihara, 1985).

- **Triaxial Testler:**Zemin örneklerinin laboratuvar ortamında üç eksenli basınç altında test edilmesi, sıvılaşma dayanımı ve deformasyon özellikleri hakkında bilgi sağlar.

- **Hidrolik iletkenlik ölçümleri:**Yeraltı suyu seviyesinin sıvılaşmaya etkisi, zemin geçirgenliğinin ölçülmesiyle değerlendirilir.

4.2 Kullanılan Yöntemler

Ampirik Yaklaşımlar

Ampirik yöntemler, geçmişteki depremlerden elde edilen saha verileri ve gözlemlerden türetilmiştir. Bu yöntemler, genellikle SPT ve CPT verilerine dayalıdır:

- **Seed ve Idriss Yöntemi (1971):**İlk sıvılaşma potansiyeli değerlendirme yöntemi olarak kabul edilen bu yöntem, zemin sıvılaşmasının oluşup oluşmayacağını değerlendirmek için SPT verilerini ve zeminin kritik gerilme oranını kullanır.
- **Robertson Yöntemi (1990):**CPT verilerine dayalı olarak geliştirilmiş bir yöntemdir. CPT ölçümleri ile sıvılaşma direnci ve sıvılaşma tetikleme oranı hesaplanır.

Numerik Modeller

Son yıllarda, sıvılaşma riskini değerlendirmek için bilgisayar destekli simülasyonlar kullanılmaktadır. Bu modeller, zemin davranışını daha detaylı anlamak ve sıvılaşmanın zamanla nasıl gelişeceğini tahmin etmek için kullanılır.

4.3 Sıvılaşma Risk Haritalarının Oluşturulması

Verilerin İşlenmesi ve Haritalandırma Süreçleri

Sıvılaşma risk haritaları, farklı alanlarda sıvılaşma riskinin mekânsal dağılımını gösteren görsel araçlardır. Bu haritaların oluşturulması, genellikle aşağıdaki adımları içerir:

1. **Zemin Verilerinin Toplanması:** Arazi ve laboratuvar çalışmalarından elde edilen veriler toplanır ve bir coğrafi bilgi sistemi (GIS) ortamında düzenlenir.
2. **Analiz ve Modelleme:** SPT, CPT ve yeraltı suyu verileri sıvılaşma potansiyeli analizine tabi tutulur.
3. **Risk Zonlarının Tanımlanması:** Sıvılaşmaya yatkın alanlar, düşük, orta ve yüksek risk bölgeleri olarak sınıflandırılır.

Şehir Planlamadaki Önemi

Sıvılaşma risk haritaları, şehir planlamasında ve yapı tasarımında kritik bir rol oynar. Özellikle, yapıların temel tasarımının sıvılaşma riskine göre optimize edilmesi ve sıvılaşmaya duyarlı bölgelerde yerleşim yoğunluğunun azaltılması için kullanılır. Kahramanmaraş Depremleri sonrası yapılan haritalar, sıvılaşmanın etkilerini en aza indirmek için yapılaşma stratejilerinin yeniden gözden geçirilmesine olanak sağlamıştır (AFAD, 2023).

5. Zemin İyileştirme ve Sıvılaşma Önlemleri

Sıvılaşma etkilerinin azaltılması veya tamamen önlenmesi, hem ekonomik kayıpların hem de can kayıplarının önüne geçilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Bu doğrultuda, sıvılaşma riski taşıyan alanlarda zemin iyileştirme teknikleri ve şehir planlama stratejileri uygulanmaktadır.

5.1 İyileştirme Yöntemleri

Sıvılaşma potansiyeli taşıyan zeminlerin dayanımını artırmak ve sıvılaşmayı tetikleyebilecek unsurları kontrol altına almak için çeşitli zemin iyileştirme yöntemleri geliştirilmiştir:

5.1.1 Dinamik Yöntemler

Dinamik yöntemler, zemini sıkıştırarak gözenekliliği azaltmayı ve sıvılaşma potansiyelini düşürmeyi amaçlar:

- **Dinamik Sıkıştırma:**Ağır bir ağırlığın belirli bir yükseklikten zemine bırakılması ile zemin sıkıştırılır. Bu yöntem, özellikle gevşek kumlu zeminlerde etkili bir çözüm sunar (Menard, 1975).
- **Vibrasyon Teknikleri:**Zemine titreşim uygulanarak zeminin yeniden düzenlenmesi sağlanır. Bu teknik, sıvılaşmaya yatkın ince daneli zeminlerde sıklıkla kullanılır.

5.1.2 Drenaj Yöntemleri

Yeraltı su seviyesinin kontrol edilmesi, sıvılaşmayı önlemenin temel yollarından biridir:

- **Dikey Drenajlar (Kum Drenler):**Zemine yerleştirilen dikey drenaj boruları, yeraltı suyunun yüzeye çıkmasını engelleyerek sıvılaşma potansiyelini azaltır (Mitchell & Wentz, 1991).

- **Geotekstil ve Geomembran Sistemleri:**Drenaj özelliklerini iyileştirmek ve yeraltı suyu hareketini yönlendirmek için kullanılan geosentetik malzemeler, sıvılaşma riskini azaltmak için etkili bir yöntemdir.

5.1.3 Zemin Stabilizasyonu

Zemin stabilizasyonu, kimyasal veya mekanik yöntemlerle zemin özelliklerini değiştirmeyi hedefler:

- **Kimyasal Stabilizasyon:**Çimento, kireç veya diğer kimyasal maddelerin zeminle karıştırılması, zeminin sıvılaşma dayanımını artırır. Özellikle kireç stabilizasyonu, ince taneli zeminlerde yaygın olarak kullanılır.
- **Jet Grout Kolonları:**Yüksek basınçlı çimento harcı enjekte edilerek zemin içinde kolon benzeri yapılar oluşturulur. Bu kolonlar, sıvılaşmaya karşı zeminin taşıma kapasitesini artırır.

5.1.4 Yüzeysel Güçlendirme Teknikleri

- **Taş Kolonlar:**Zemine taş veya iri agregalarla doldurulan kolonlar yerleştirilerek taşıma kapasitesi artırılır. Bu yöntem, sıvılaşma riski yüksek olan alanlarda sıklıkla tercih edilir (Barksdale & Bachus, 1983).
- **Geogrid Takviyeleri:**Geogridler, zemin ile yapı arasındaki yük dağılımını iyileştirerek sıvılaşma sonrası oluşabilecek deformasyonları azaltır.

5.2 Şehir Planlama ve Yapılaşmaya Yönelik Öneriler

5.2.1 Risk Bölgelerinin Belirlenmesi

Sıvılaşma risk haritaları, şehir planlamasında önemli bir rehberdir. Riskli bölgelerde:

- Yüksek katlı yapıların inşası sınırlandırılabilir.
- Kritik altyapılar (hastaneler, okullar) sıvılaşmaya yatkın zeminlere inşa edilmekten kaçınılabilir.

5.2.2 Temel Tasarımı

Zemin sıvılaşmasının etkilerinin azaltılması için uygun temel sistemlerinin seçimi önemlidir:

- **Derin Temeller:**Kazık temeller gibi derin temel sistemleri, sıvılaşmadan etkilenmeyen sağlam zemin katmanlarına ulaşarak yapının stabilitesini artırır.

- **Yüzer Temeller:** Sıvılaşma durumunda zemindeki gerilimi azaltarak yapının oturmasını ve eğilmesini en aza indirir.

5.2.3 Yasal Düzenlemeler ve Yönetmelikler

Sıvılaşma riski yüksek bölgelerde yapılaşmayı düzenlemek için yasal düzenlemeler gereklidir. Örneğin, Japonya gibi deprem riski yüksek ülkelerde sıvılaşma yönetmelikleri, yapıların tasarımı ve zemin iyileştirme yöntemlerinin uygulanmasını zorunlu kılar (JGS, 1998).

5.3 Kahramanmaraş Depremleri Sonrası Önlemler

2023 Kahramanmaraş Depremleri, sıvılaşma riskinin etkilerinin ne kadar yıkıcı olabileceğini bir kez daha göstermiştir. Deprem sonrası yapılan zemin etütleri ve sıvılaşma analizleri, sıvılaşmaya yatkın alanlarda şehir planlaması ve yapılaşma stratejilerinin yeniden gözden geçirilmesini sağlamıştır. AFAD ve yerel yönetimler, bu bölgelerde zemin iyileştirme projelerine öncelik vererek sıvılaşma riskini azaltmayı hedeflemektedir (AFAD, 2023).

6. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada, zemin sıvılaşmasının mühendislik ve şehir planlama üzerindeki etkileri kapsamlı bir şekilde ele alınmıştır. Zemin sıvılaşmasının önlenmesi ve etkilerinin azaltılması için, yerel yönetimlerin sıvılaşma risk haritalarını dikkate alarak doğru yapılaşma kararları almaları gerekmektedir. Ayrıca, sıvılaşmaya eğilimli bölgelerde zemin iyileştirme yöntemlerinin uygulanması, depremler sırasında oluşabilecek zararın önlenmesinde etkili olacaktır.

Kaynaklar

AFAD. (2023). *Kahramanmaraş depremleri sonrası saha çalışmaları raporu*. Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı.

Barksdale, R. D., & Bachus, R. C. (1983). *Design and construction of stone columns*. Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation.

Idriss, I. M., & Boulanger, R. W. (2008). *Soil liquefaction during earthquakes*. Earthquake Engineering Research Institute (EERI).

Japanese Geotechnical Society (JGS). (1998). *Remedial measures against soil liquefaction*. Tokyo: JGS Publications.

Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical earthquake engineering*. Prentice Hall.

Menard, L. (1975). *Dynamic compaction: An overview of applications*. Proceedings of the Conference on Soil Improvement Techniques.

Mitchell, J. K., & Wentz, F. J. (1991). *Soil improvement for seismic risk mitigation*. Proceedings of the ASCE Specialty Conference on Earthquake Engineering.

Robertson, P. K., & Wride, C. E. (1998). *Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test*. Canadian Geotechnical Journal, 35(3), 442–459.

Seed, H. B., & Idriss, I. M. (1971). *Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential*. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 97(9), 1249–1273.

Tokimatsu, K., & Yoshimi, Y. (1983). *Empirical correlations of soil liquefaction based on SPT blow counts*. Soils and Foundations, 23(4), 56–74.

Youd, T. L., & Idriss, I. M. (2001). *Liquefaction resistance of soils: Summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 127(4), 297–313.