

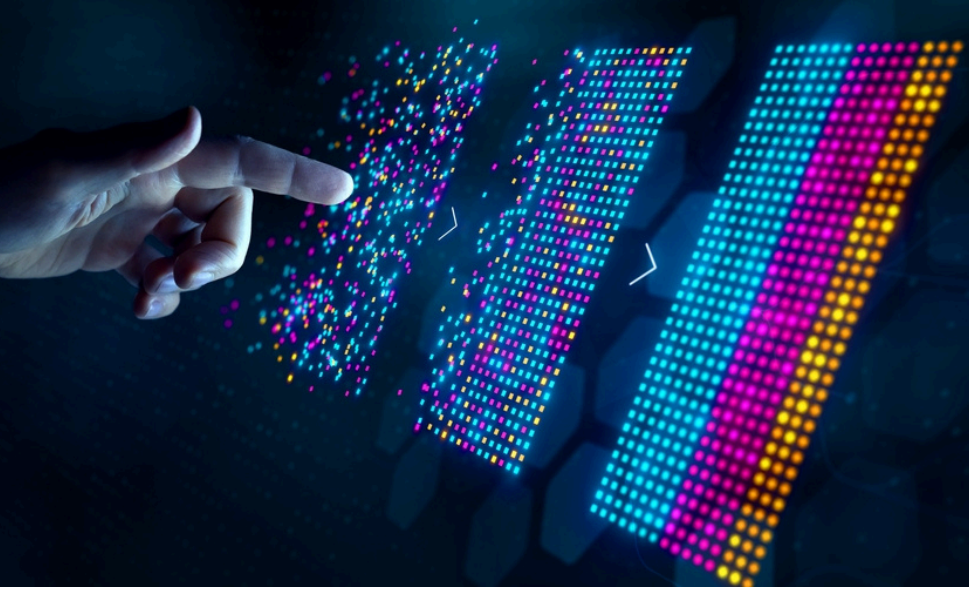
ISBN: 978-625-6069-68-8

MÜHENDİSLİKTE AKTÜEL YAKLAŞIMLAR

Editörler:

Prof. Dr. Akın ÖZÇİFT

Doç. Dr. Fatih YÜCALAR



MÜHENDİSLİKTE AKTÜEL YAKLAŞIMLAR

Editörler

Prof. Dr. Akın ÖZÇİFT

Doç. Dr. Fatih YÜCALAR



MÜHENDİSLİKTE AKTÜEL YAKLAŞIMLAR

Editörler: Prof. Dr. Akın ÖZÇİFT , Doç. Dr. Fatih YÜCALAR

Genel Yayın Yönetmeni: Berkan Balpetek

Kapak ve Sayfa Tasarımı: Duvar Design

Yayın Tarihi: Ağustos 2024

Yayıncı Sertifika No: 49837

ISBN:978-625-6069-68-8

© Duvar Yayınları

853 Sokak No:13 P.10 Kemeraltı-Konak/İzmir

Tel: 0 232 484 88 68

www.duvar yayinlari.com

duvarkitabevi@gmail.com

İÇİNDEKİLER

1. Bölüm5

Tasarlanan VTM Tozaltı Helezon Kaynak Tezgâhıyla Yapılan
Kaynak Dikişlerinin Borla Kaplamasının İncelenmesi
Bora ÖZBAŞ, Aydın ŞIK, TurabiBİNGÖL

2. Bölüm 23

Derin Öğrenme ve Yapay Zekâ Tabanlı Öneri ve
Görüntü İzleme Sistemlerinin Fiziksel Mağazalarda
Müşteri Deneyimini İyileştirmedeki Etkisinin İncelenmesi
Beytullah BOZALÍ, Aleyna Nur ÇARKACI

3. Bölüm 47

Nesnelerin İnterneti ve Güvenliği
Çiğdem BAKIR

4. Bölüm 65

Yapay Zekâ Kullanımı ile Yazılım Proje Dokümantasyonunun Hazırlanması
Fatih YÜCALAR, Akın ÖZÇİFT

5. Bölüm 80

Bazaltlar ve Endüstriyel Kullanım Alanları
Gizem Arslan

6. Bölüm 90

Muğla Köyceğiz Mermerlerinin Beton Agregası Özellikleri ve
Beton Olarak Kullanılabilirliği
Hakan ELÇÍ, Ramazan HACIMUSTAFAOĞLU

7. Bölüm 104

Terk Edilmiş Boksit Madenciliğinin Çevre Sağlığına Etkisi:
Şarkikaraağaç Boksit Madeni Örneği (Isparta/Türkiye)
Mehmet ÖZÇELİK

8. Bölüm 122

Avgamasya (Şırnak) Asfaltit Ocaklarında Üç Boyutlu (3B)
Jeolojik Model Oluşturarak Üretimin Hızlandırılması Çalışmaları

Fatih ÖZGÜL, Mehmet ÖZÇELİK

9. Bölüm 133

Alçı Harcının Fiziksel, Mekanik ve Termal Performansına
Su İtici ve Hava Sürükleyici Katkıların Etkileri

Metin DAVRAZ

10. Bölüm 151

Elektrikli Araçlar ve Şarj İstasyonları

Ahmet ALBAYRAK, Metin KAYNAKLI

11. Bölüm 171

Tarhananın Fonksiyonel Özelliklerinin Geliştirilmesinde Bazı Proses ve Katkı
Maddelerinin Uygulanabilirliği Üzerine Bir Araştırma

Süleyman GÖKMEN, Abdülkadir DİLBER

12. Bölüm 187

4D Baskı ve Biyomalzemeler

Zülfü TÜYLEK

13. Bölüm 214

3D Baskı için Akıllı Biyomateryaller

Zülfü TÜYLEKİ

1. Bölüm

Tasarlanan VTM Tozaltı Helezon Kaynak Tezgâhıyla Yapılan Kaynak Dikişlerinin Borla Kaplamasının İncelenmesi

Bora ÖZBAŞ¹
Aydın ŞİK²
Turabi BİNGÖL³

¹ Gazi Üniversitesi Mimarlık Fakültesi Endüstriyel Tasarım Bölümü ozbasbora@gmail.com,
ORCID: 0009-0006-9171-021X

² Gazi Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi Endüstriyel Tasarım Bölümü Öğretim Üyesi, aydins@gazi.edu.tr,
ORCID: 0000-0003-3746-4178

³ Birikim Mühendislik ve Endüstriyel Yüklenim Ltd. Şti. Tasarım Merkezi Ankara,
t.bingol@birikimmuhendislik.com.tr, ORCID: 0000-0001-7757-7236

ÖZET

Metallerin birleştirilmesinde kullanılan en yaygın yöntem, kaynaklı birleştirme yöntemidir. Bir kaynak işleminin başarısı aynı zamanda birleşme yerindeki dayanıma bağlıdır. Kaynak dikişi yüzeylerinde oluşan malzeme taşınımı veya kaybı bu malzemelerin çalışma esnasındaki ömrünü ve çalışma performansını etkileyeceğinden ekonomik ve emniyet açısından çok önemlidir. Özellikle kırılma ve abrasiv aşınma endüstriyel kaynak dikişlerinde malzeme kayıplarının başlıca sebebidir. Bu nedenle aşınmaya ve kırılmaya ya da kopmaya karşı daha dirençli kaynak dikişlerinin yapılması gittikçe önem kazanmaktadır. Malzeme yüzeyindeki kütle azalma ya da dayanıksız bir kaynak dikişi genel olarak makine bileşenlerinin de zarar görmesine neden olmakta ve çok ciddi yapısal hasarların oluşmasına yol açmaktadır.

Maden ocaklarında kullanılan dikey karıştırıcı öğütücülerin vida yapraklarının mile kaynak dikişlerinin incelenerek daha dayanıklı ve uzun ömürlü olması istenmektedir. Vida yapraklarının mile tozaltı kaynak yöntemi kullanılarak yapılan kaynaklarda çeşitli sorunlar yaşanması nedeniyle alan araştırması incelenmiş ve bu çalışma hazırlanmıştır.

Bu çalışmada, Hardox 500 çelikleri Tasarlanan VTM Tozaltı Helezon Kaynak Tezgâhı ile çelik döküm VTM vida yapraklarının büyük çaplı dolu mile kaynak yapılan kaynak dikişlerine bor kaplama işlemi uygulanarak kaynak dikişlerinin metalografi, sertlik ve aşınma direnci incelenmesi yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: VTM Tozaltı Helezon Kaynak Tezgâhı, Hardox 500, Metalografi, Sertlik, Aşınma

1. GİRİŞ

Kaynaklı konstrüksiyonda dayanım düşüklüğünün meydana gelme olasılığının en yüksek olduğu yer kaynak dikiş bölgesidir. Malzeme dayanımını artırmak için çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Bu yöntemlerden biri de yüzey kaplama işlemleridir. Bir metalin yüzeyini metal, ametal veya organik madde ile kaplayarak, malzemeyi hem görünüş hem de fiziksel ve kimyasal bakımdan daha dayanıklı hale getirmek amacıyla yapılmaktadır (Uysal 2006). (Bozkurt 1984).

Yüksek aşınma, korozyon direnci veya termal yalıtım elde etmek için metal bir nesnenin maruz kalan alanı yüzey kaplamasıyla kaplanabilir. Yüzey kaplama ayrıca hasarlı parçaları onarmak için de kullanılabilir. Böylece komple parça değişimi gereksiz hale gelir ve bu yenileme parçanın ömrünü etkili bir şekilde uzatır. Tüm bu uygulamaların ortak paydası, aşınma, korozyon, ısı, aşınma

ve/veya darbe direnci elde etme ihtiyacıdır.

Bor kaplanmış yüzeyin avantajları;

- Özellikle sertleşebilir birçok çelik grubuyla kıyaslanabilen, yüzey özelliklerinin elde edilebildiği bir işlemdir (Sinha 1991).
- Demir esaslı malzemelerin oksidan olmayan seyreltik asitlere karşı korozyon direncini ve bu malzemelerin erozyon dirençlerini artırmaktadır.
- Borlanan parça, oksidan ve korozif ortamlarda üstün bir yorulma ömrüne sahiptir (Sinha 1991) (Toprak, 2019) (Kara, 2016).

Bor atomlarının ana metale difüze edilerek yüzeyde sert bir ara bor bileşiği oluşturduğu termo-kimyasal bir yüzey sertleştirme difüzyon kaplamasıdır. Elde edilen yüzey borürü tek fazlı veya çift fazlı borür tabakası şeklinde olabilir. Borlanmış tabakanın sağladığı aşınma/performans avantajları, geniş uyumlu alt tabaka yelpazesi ve işlemin maliyet etkin yapısıyla birleştiğinde, borlama genellikle karbon çeliği bileşenlerinin genel aşınma direnci için sıcaklık ve aşınma direnci nedeniyle belirli takım uygulamalarında kullanılır.

Metallerin birleştirilmesinde kullanılan en yaygın yöntem, kaynaklı birleştirme yöntemidir. Bir kaynak işleminin başarısı aynı zamanda birleşme yerindeki dayanıma bağlıdır. Özellikle kırılma ve abrasiv aşınma endüstriyel kaynak dikişlerinde malzeme kayıplarının başlıca sebebidir. Bu nedenle aşınmaya ve kırılmaya ya da kopmaya karşı daha dirençli kaynak dikişlerinin yapılması gittikçe önem kazanmaktadır

Dikey karıştırıcı öğütücüler çeşitli maden cevherinin ekonomik olarak öğütülmesinde kullanılırlar. Karıştırma vidası öğütme haznesinin üstüne dik eksenli çalışacak şekilde yataklanır. Öğütücü, karıştırma sırasında oluşan zorlanmalara karşı mukavim olması ve rijitliğini koruması istenir. Vida yapraklarının mile kaynağı yapılırken çeşitli sorunlar yaşanmaktadır. Bu sorunu çözmek için Birikim Mühendislik ve Endüstriyel Yüklenim Ltd. Şti.'nde VTM Tozaltı Helezon Kaynak Tezgâhı ile çözülmeye çalışılmıştır.

Karıştırma vidası öğütme haznesinin üstüne dik eksenli çalışacak şekilde yataklanır. Öğütücü, karıştırma sırasında oluşan zorlanmalara karşı mukavim olması ve rijitliğini koruması istenir. Vida yapraklarının mile tozaltı kaynak yöntemi kullanılarak yapılan kaynaklarda çeşitli sorunlar yaşanmaktadır. Bu nedenle Birikim Mühendislik ve Endüstriyel Yüklenim Ltd. Şti.'nde kalın çelik döküm VTM vida yapraklarının büyük çaplı dolu mile kaynak işlemi yapılırken yaşanan sorunları çözmek için bir tozaltı kaynak tezgâhı tasarlanmıştır (Şekil 1.). Bitişik yapraklar arasındaki alın kaynaklarını ve yaprak kökü ile dolu mil arasındaki köşe kaynaklarını toz altı kaynak makinesi ile otomatik olarak

yapabilen kaynak tezgâhı tasarımı başarılı bir şekilde kullanılmaktadır. Bu tasarım ile tezgâha yedi farklı boyutta ağır karıştırıcı vidası bağlanabilmektedir. Tezgâhta kaynak işlemleri operatör gözetiminde otomatik veya yarı otomatik yapılabilmektedir.



Şekil 1. Tasarlanmış olan Tozaltı Helezon Kaynak Tezgâhı (VTM) (Birikim Mühendislik Tasarım Merkezi)

Bitişik vida yapraklarını birbirine bağlayan iki taraflı alın kaynağı, vida yapraklarının kökü ile dolu mili bağlayan iki taraflı köse kaynakları yapılabilmektedir. Kaynak anında ısıya bağlı olarak oluşan deformasyonları dengeleyebilmek için parça konumu kolayca ve hızla değiştirilerek bir sonraki kaynak ters tarafta uygulanabilmektedir. Tüm çalışmalar sırasında tezgâh sabit kalabilmektedir. Dört çalışanın yaptığı kaynak işlemlerini bu tezgâh tasarımı ile tek çalışana indirilmiştir.

Tozaltı Helezon Kaynak Tezgâhında kullanılan tozaltı kaynak yöntemi, ağır yapısal kaynakta yaygın olarak kullanılan yüksek verimli bir kaynak işlemidir. Yüksek derinlikte penetrasyona ve yüksek birikme oranına sahiptir. Elektrod telinin bir makaraya sarılmış bir tel bobini aracılığıyla beslendiği kesintisiz bir kaynak işlemidir. Kaynak, kıvılcım, duman veya sıçrama olmadan gerçekleştirilir. Kaynak dikişi çok temiz ve pürüzsüzdür. Üretilen kaynaklar, iyi mekanik ve metalurjik özelliklere sahip yüksek kalitededir. Dikişin şekli, penetrasyonu, cüruf giderme ve kaynak kalitesi, ark voltajı, kaynak akımı, ilerleme hızı, tel hızının kontrol edilme şekli ve sabit akım veya sabit voltajın kaynak çıkış türü gibi birçok parametrelere bağlıdır.

Tozaltı ark kaynağı parametreleri, kaynak bağlantısının kalite verimliliğini ve maliyetini etkileyen en önemli faktörlerdir. Maksimum metal biriktirme oranına ulaşmak için AC - DC veya her ikisinin kombinasyonunu kullanan bir ark kaynağı işlemi biçimidir.

2. MATERYAL VE METOD

2.1. Kaynak İşlemleri

Kaynak işlemi, tasarlanan tezgâh ile Tablo 1’de ana malzeme olarak HARDOX 500 çeliği ve Tablo 2’de bileşimi verilen elektrod ile yapılmıştır. Karıştırıcı vidalarda yaprak mile kaynak edilirken üst üste çok sayıda kaynak dikişi yapılmaktadır. Birinci ve ikinci kaynak dikişi MIG/MAG kaynağı ile yapıldığı için kaynak serpintisi ve cürufun çoğu temizlenmiştir ama kaynak üzeri taşlanmamıştır (Şekil 2 ve Şekil 3). Daha sonra tozaltı kaynak yöntemi ile gerekli olan birleştirme sağlanmıştır.

Tablo 1. Kaynak yapılan ana malzemenin kimyasal bileşimi

Kullanılan malzeme	Kimyasal Bileşim								
	C	Mn	Cr	Si	Mo	P	S	B	Ni
Hardox 500	0,3	1,6	1,5	0,7	0,6	0,02	0,001	0,005	0,15

Tablo 2. Tozaltı kaynak makinesinde kullanılan elektrodların kimyasal bileşimi

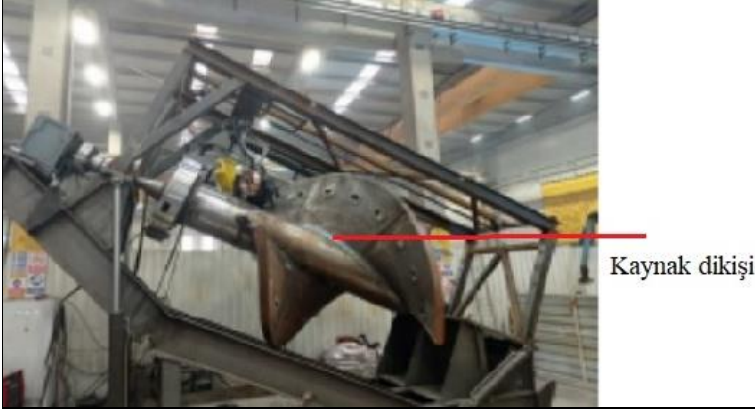
Kullanılan elektrod	Kimyasal Bileşim			
	C	Mn	Si	Mo
EN ISO 14171-A S2	0,095	0,100	0,15	0,50



Şekil 2. Kaynak yapılışı



Şekil 3. Kaynak dikişleri



Şekil 4. VTM Tozaltı Helezon Kaynak Tezgâhı ile yapılan kaynak dikişi

2.2. Bor Kaplama İşlemi

Deneyssel; “Bor kaplama işlemi” çalışmaları Salihli/Manisa Vezneli A. Ş.’den bir fırın sisteminde (İnert atmosferde) Argon gazı altında kutu ortamda borlama işlemi ile gerçekleştirilmiştir. Numunelerinin borlama işlemi argon gaz akışı debisi (1 litre/saat) ortamında katı borlama işlemi ile gerçekleştirilmiştir. Borlama işlemi Ekabor 2 toz karışımı (%90 SiC, % 5 B4C, %5 KBF4) kullanılarak 900 °C, sıcaklıkta 4 saat süresinde işlem parametrelerinde yapılmıştır. Deneylerde paslanmaz çelik (AISI) pota kullanılmıştır. Ekabor 2 toz karışımıyla doldurulmuş pota içerisine Ø 100 mm x100 mm boyutlarındaki numuneler gömülerek potanın ağzı kapatılmış böylelikle oksijenle temas engellenerek istenilen borür tabakaları elde edilmeye çalışılmıştır. Borlama işlemi tamamlandıktan sonra numuneler fırın içerisinde soğutulmuşlardır (Şekil 5.).

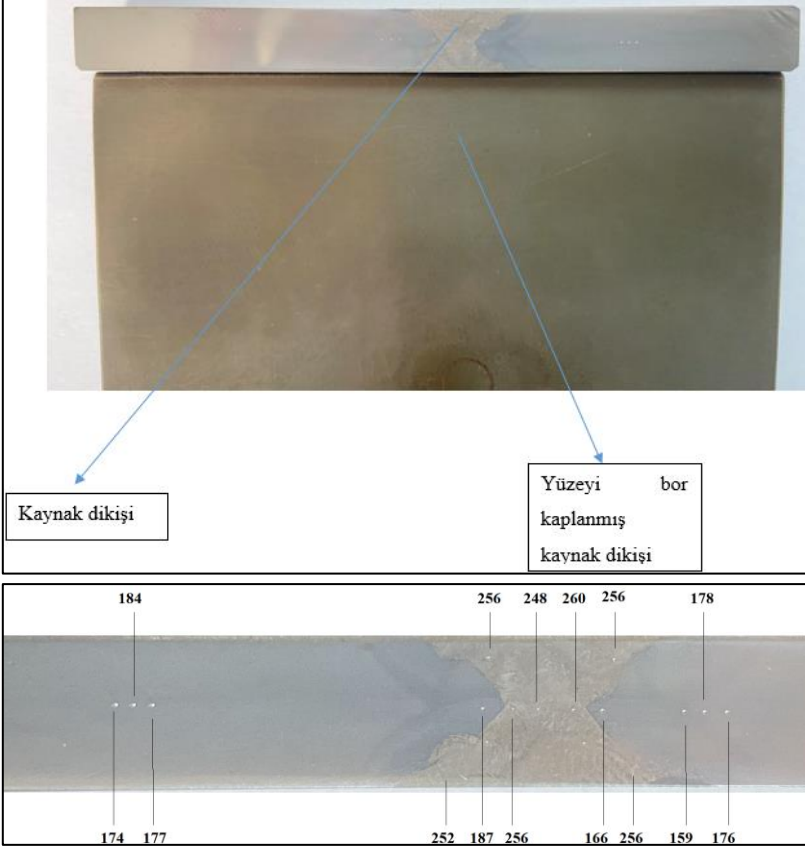


Şekil 5. Borlanmış deney numuneleri

2.3. Sertlik Ölçümleri

HV veya daha çok bilinen adıyla Vickers sertlik testi, en yaygın kullanılan sertlik ölçüm birimlerinden birisidir. Şekil 6’da gösterildiği gibi ölçümler

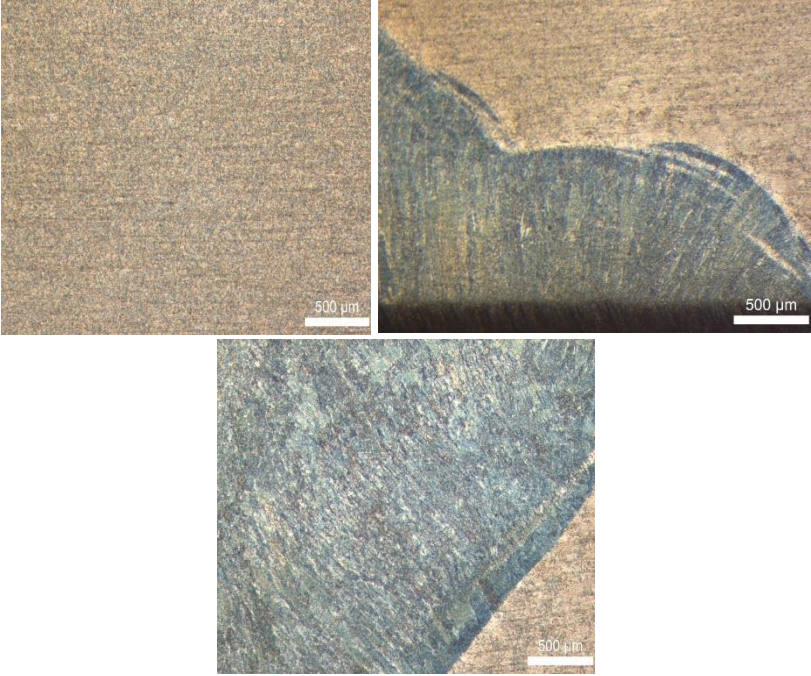
yapılmıştır.



Şekil 6. Sertlik ölçümleri HV5

2.4. Metalografik İnceleme

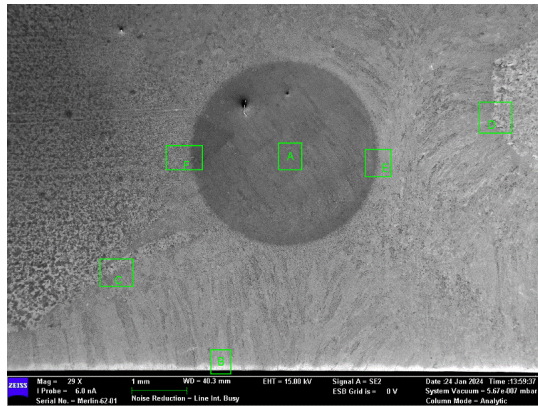
Metalografi, metallerin ve alaşımların yapısının ve oluşumunun incelenmesinden oluşur. Çıplak gözle numune incelemesiyle çok şey öğrenilebilir ancak daha rafine teknikler malzemenin yüzeyinin büyütülmesini ve hazırlanmasını gerektirir. Genel amaçlı inceleme için optik mikroskop yeterlidir. Gelişmiş inceleme ve araştırma laboratuvarları genellikle elektron mikroskopları (SEM ve TEM), x-ışını, elektron difraktometreleri ve muhtemelen diğer tarama cihazlarını içerir. Bu çalışmada, Şekil 7’de görülen metalografi incelemeler Taramalı Elektron Mikroskopunda yapılmıştır.



Şekil 7. Mikroyapı fotoğrafları

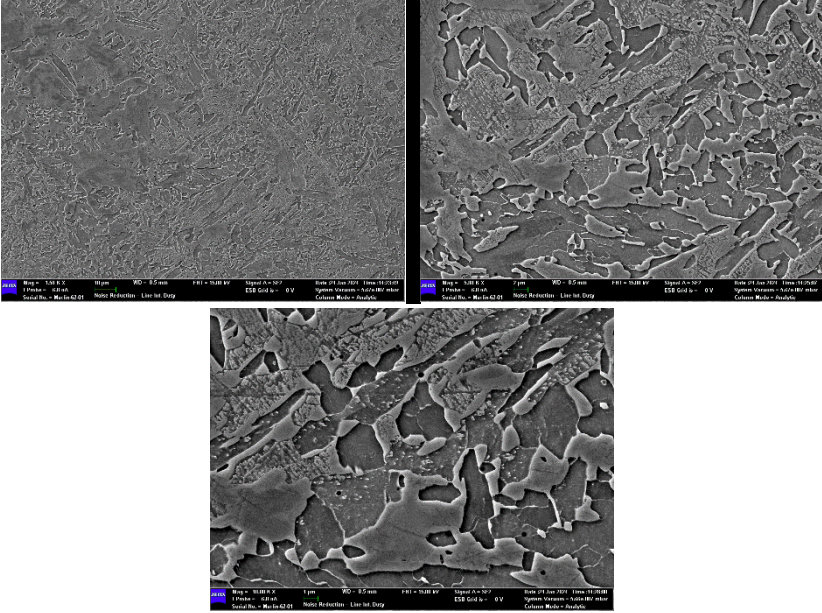
2.5. SEM İnceleme (Bor Kaplama Kalınlığı)

Taramalı elektron mikroskobu (SEM), katı nesnelerin mikro ve nano parçacık görüntüleme karakterizasyonunun incelenmesi ve analizi için en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir. SEM'in parçacık boyutu analizi için tercih edilmesinin nedenlerinden biri, 10 nm, yani 100 Å çözünürlüğüdür. Şekil 8-14 arası bor kaplama kalınlığı ölçümünde SEM elektron mikroskobu kullanılmıştır.



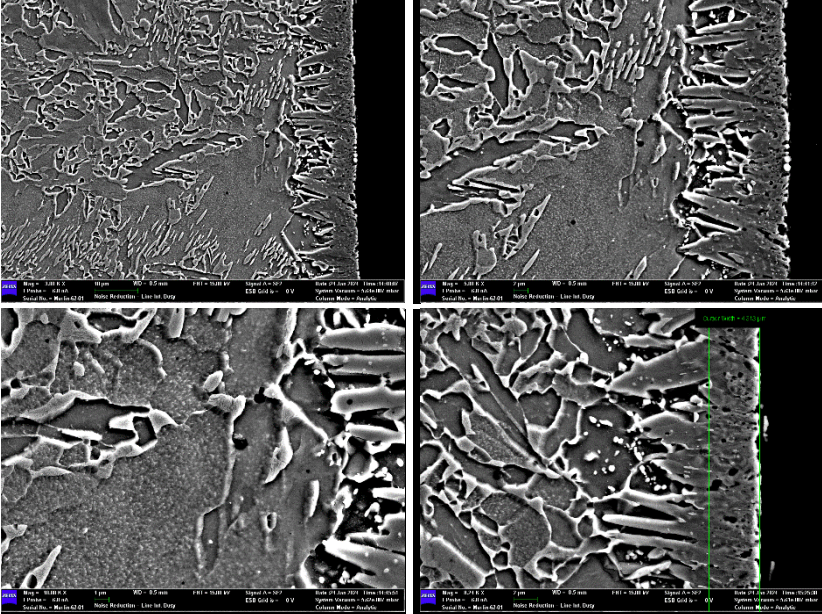
Şekil 8. Bor kaplama yüzeyinin incelenmesi

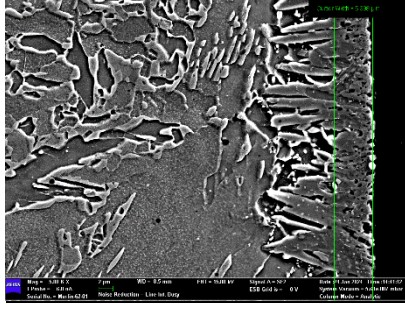
A No 01-02-03 ÇEKİMLER



Şekil 9. A noktasında bor kaplama incelenmesi

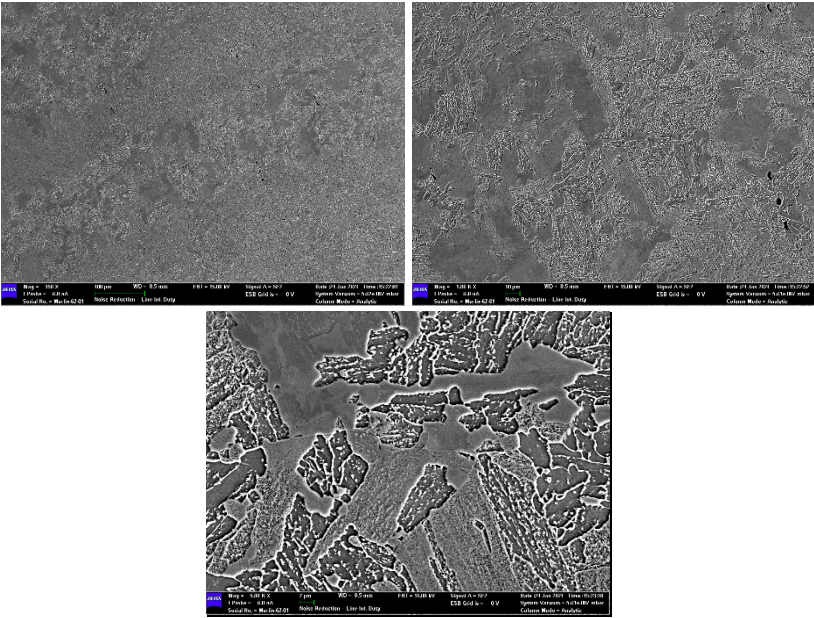
B No 1-2-3-4-5 ÇEKİMLER





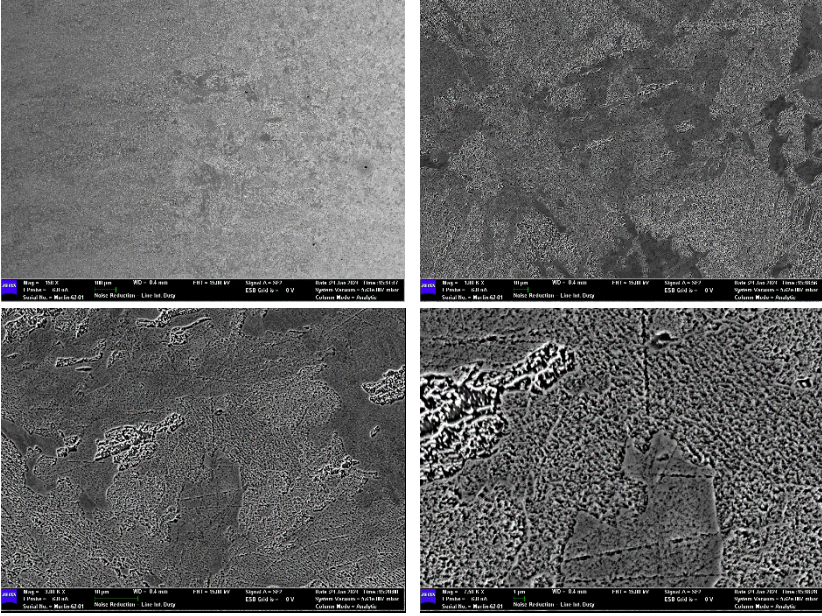
Şekil 10. B noktasında bor kaplama incelenmesi

C No 1-2-3 ÇEKİMLER



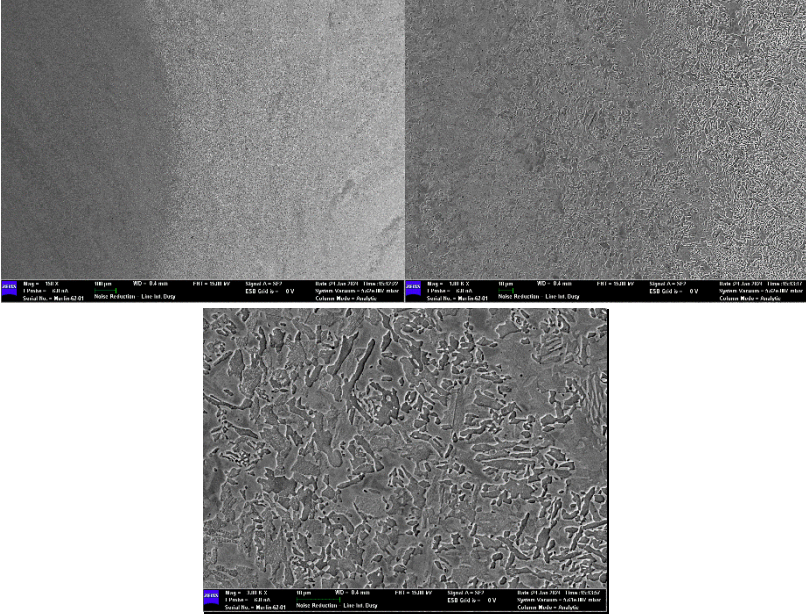
Şekil 11. C noktasında bor kaplama incelenmesi

D 1-2-3-4 ÇEKİMLER



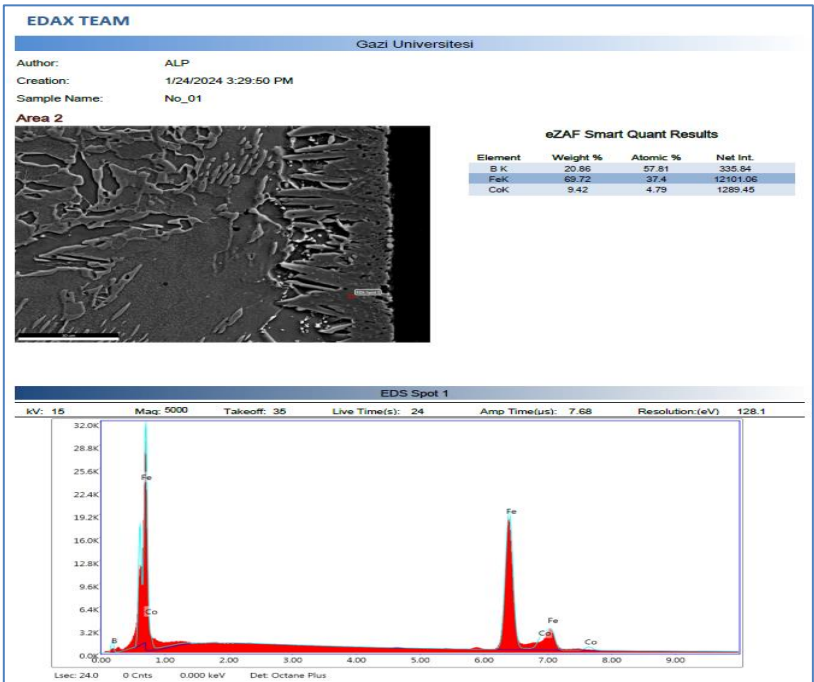
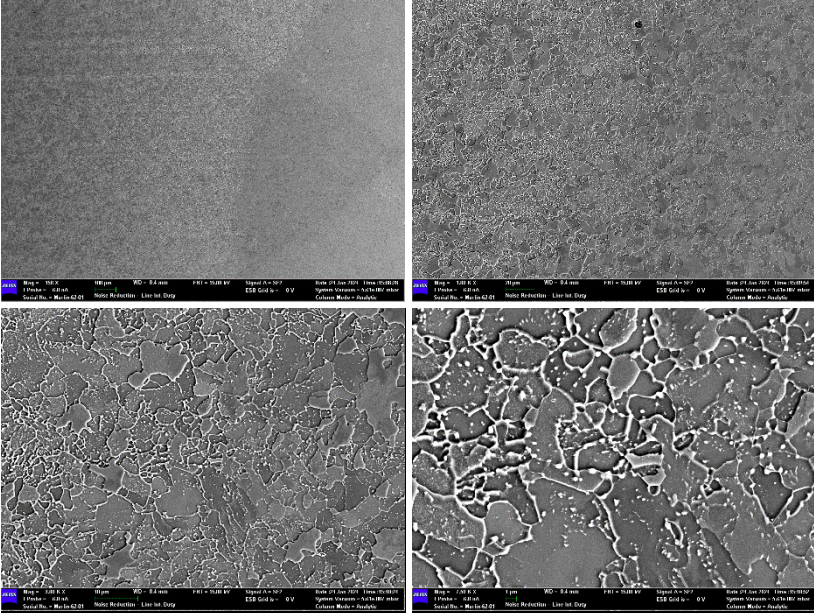
Şekil 12. D noktasında bor kaplama incelenmesi

E 1-2-3 ÇEKİMLER



Şekil 13. E noktasında bor kaplama incelenmesi

F 1-2-3-4 ÇEKİMLER



Şekil 14. Bor kaplama kalınlığı

2.6. Aşınma İncelemesi

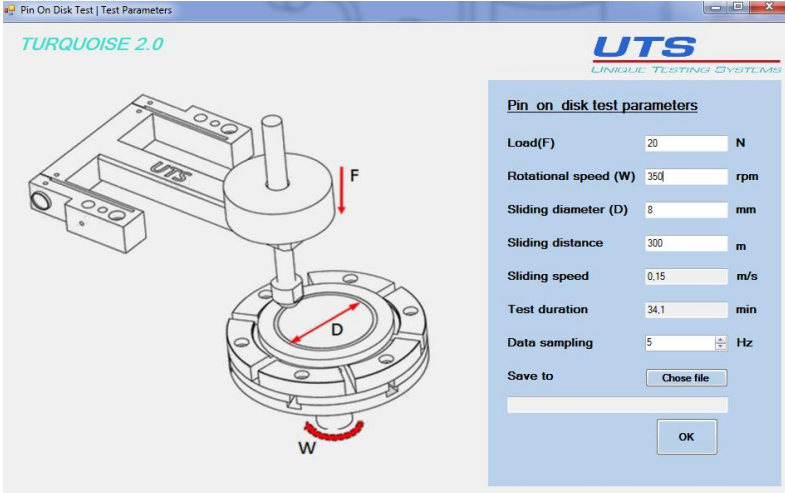
Disk üzeri pim (pin-on-disk) aşınma testi deneyi, UTS T10/20 model Tribometre Kuru kaymalı aşınma deneyleri makinesinde ASTM G99-17 standardına uygun aşınma deneyi yapılmıştır.



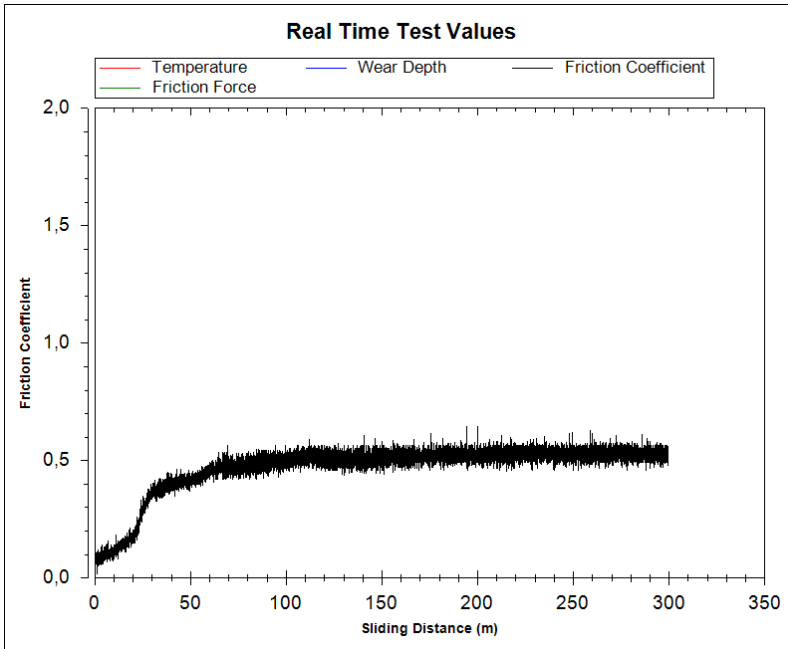
Şekil 15. Aşınma deney cihazı



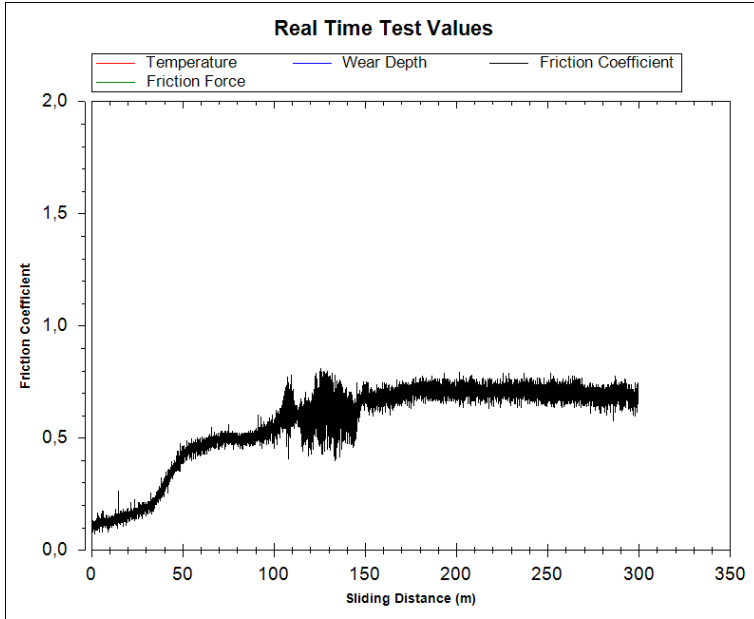
Şekil 16. Aşınma deneyi yapılmış numune



KAYNAK DIKİŞİ



ANA MALZEME



Şekil 17. Aşınma deney sonuçları

3. SONUÇLAR

HARDOX 500 çeliğinin kaynaklı bağlantı sonrası dikiş yüzeyi taşlanarak Bor yayındırma işleminin yapılması ve sonrası kaynak bölgesinin incelenmesinde, mikro yapı incelemeleri, kaynak dikiş kesitte yapılan sertlik taraması, içyapının ve dikiş üst yüzeyin elektron mikroskobu ile incelenmesi, bor tabakasının aşınma direncinin incelendiği bu proje de, ortaya çıkan gözlemler aşağıda sıralanmıştır;

1. Yapılan incelemeler sonucunda film karakterizasyonu or kaplamanın başarı ile elde edildiği görülmüştür.

2. HARDOX 500 çeliğinin kaynaklı bağlantı sonrası dikiş yüzeyi taşlanarak yapılan bor kaplanmış yüzey düz ve pürüzsüz morfolojide bir bor tabakası elde edilmiştir.

3. Çift taraflı ve çok pasolu tozaltı kaynak bölgesinde yapılan kaynak kesiti metalografik incelemelerinde; kaynak dikişinin IEB bölgesinde kaynak artık ısıl gerilmelerine bağlı olarak herhangi bir çatlak oluşmadığı, IEB'nin oluşumunun normal geçiş bölgesi şeklinde olduğu görülmektedir.

4. Kaynak bölgesinde yapılan sertlik ölçümlerinde IEB sertliğinin yapıyı gevrek hale getirecek sertlik değerlerinde olmadığı (350HV'nin altında kalarak) ve dolayısıyla güvenilir olduğu saptanmıştır.

5. Kaynak dikişinde ve IEB de gözeneklerin oluşmadığı ve tipik temperlenmiş martenzit yapılarının ortaya çıktığı görülmüştür.

6. Yüzeğe yayındırılmış Bor tabakası gayet homojendir ve kaynak dikişi ve ana malzemenin tüm yüzeyinde oluşmuş Bor Karbür (BC) sertliği içermektedir.

7. Bor Karbür tabakasının altında herhangi bir gözenek oluşumu ve çatlak oluşumu gözlenmemektedir.

8. Yüzeyde yapılan pin on disk aşınma deneyi sonucunda bor tabasının aşınmasının esas metaldekine nazaran çok geç oluşabildiği ve bununda hafriyat ürünlerine karşı esas metale nazaran aşınmayı uzun süre geciktireceği görülmektedir.

9. HARDOX 500 gibi aşınma dirençli bir termomekanik haddelenmiş ince taneli çelikte kaynak sonrası yapılacak Bor kaplaması ile yüzeyde elde edilen BC filmi, aşınma kayıplarını çok azaltarak ülkemiz ekonomisine de yarar sağlayacaktır.

Teşekkür;

Bu çalışma, TÜBİTAK 2209-B Üniversite Öğrencileri Sanayiye Yönelik Araştırma Projeleri Destekleme Programı Başvuru, Program Kodu: 2209-B, Başvuru Dönemi: 2022 / 2, Başvuru Numarası: 1139B412201223 'nolu proje kapsamında desteklenmiştir. Kuruma bu katkılarından dolayı teşekkür ederiz.

Proje ortakları:

- 1. TÜBİTAK 2209-B Üniversite Öğrencileri Sanayiye Yönelik Araştırma Projeleri Destekleme Programı, Program Kodu: 2209-B Ankara*
- 2. Gazi Üniversitesi Mimarlık Fakültesi Endüstriyel Tasarım Bölümü Ankara*
- 3. Birikim Mühendislik ve Endüstriyel Yüklenim Limited Şirketi Tasarım Merkezi Ankara*

4. KAYNAKLAR

1. Şık, A. Akay, A., Bingöl, T., Özdemir, R. "VTM submerged screw welding machine design" International conference on global practice of multidisciplinary scientific studies 06.03.2022 Kıbrıs
2. Kara, R., Çolak, F. & Kayalı, Y. Borlu Çeliklerin Aşınma ve Yapışma Davranışlarının İncelenmesi. Trans Indian Inst Met 69, 1169–1177 (2016). <https://doi.org/10.1007/s12666-015-0698-2>
3. Akay, A. (2013). Farklı özellikteki malzemelerin tozaltı ark kaynak yöntemi ile birleştirilmesi ve birleştirmelerin tahribatlı ve tahribatsız muayenesi. SAÜ. Fen Bil. Der., 85-96.

4. Nogay, M. N. (2007). Helezon Konveyörler Tasarım Kriterleri. Helezon Konveyörler Tasarım Kriterleri. İstanbul: Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Müh. Böl. Yüksek Lisans Tezi.
5. Bunshatta R.F. (1980). High rate physical vapour deposition processes. Agard Lecture Series No: 106, Material Coating Techniques, Hardford House, London, s:21-26.
6. Aytaç, A., İlivan, M., Gül, F. (2016). The effect of TiN and CrN coating on the abrasive wear behavior of cold-work tool steels. Journal of the Balkan Tribological Association, 1:22 (3A-1):3254-3269.
7. Kusano, E., Kitagawa, M., Kuroda, Y., Nanto, H., Kinbara, A. (1998). Adhesion and hardness of compositionally gradient TiO₂/Ti/TiN, ZrO₂/Zr/ZrN and TiO₂/Ti/Zr/ZrN coatings. Thin Solid Films, 334:151-155.
8. Samtaş, G., Sert, H. (2012). Doğrudan buhar biriktirme tekniği (DVD). SDÜ Teknik Bilimler Dergisi, 2 (4):30-40.
9. Bozkurt, N., 1984, “Bor yayınımları ile çeliklerde yüzey sertleştirme”, Doktora tezi, GTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
10. Campos, I., Palomar, M., Amador, A., Ganem, R., Martinez, J., 2006, “Evaluation of the corrosion resistance of iron boride coatings obtained by paste boriding process” Surface & Coatings Technology 201, pp.2438–2442.
11. Çetin, M., 2003, “Borlanmış Haldfield Çeliklerinin Aşınma Dayanımının İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi, Makine Eğitimi Bölümü, Kütahya.
12. Fichtl, W., Trausner, N., Matuschka, A. G., 1987, “Borieren mit Ekabor”,ESK GmbH. 182
13. Genel K., 2006, ” Boriding kinetics of H13 steel” Vacuum 80, pp. 451–457.
14. Güneş, G., Ülker G., Taktak, G., 2011, “Plasma Paste Boronizing of AISI 8620, 52100 AND 440C Steels”, Materials and Design, In Press,
15. Jordan, L.R., Betts, A.J., Dahm, K.L., Dearnley, P.A., Wright, G.A., 2005, “Corrosion and passivation mechanism of chromium diboride coatings on stainless steel” Corrosion Science 47, pp. 1085–1096.
16. Kayalı, Y., 2006, “Bortemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Mekanik Özellikleri ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi” Yüksek Lisans Tezi A.K.Ü., Fen Bil. Ens., Afyon.
17. Matuschka, A.G.,1980, “Boronizing” Carl Hanser Verlag München.
18. Sinha, A. K., 1991, “Boriding(Boronising)”, ASM Handbook, Vol. 4, J. Heat Treating, pp. 437–447. 190

19. Uslu, I., Comert, H., Ipek, M., Ozdemir, O., Bindal, C., 2007, "Evaluation of borides formed on AISI P20 steel" *Materials and Design* 28, 55–61.
20. Uysal, M., 2006, "CrN, TiN Kaplanmış ve Kaplanmamış AISI 304 paslanmaz çeliğin korozyon özellikleri", Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üni., Fen Bil.Ens., Ankara.
21. Kara, R. Ç. (2016). Investigation of Wear and Adhesion Behaviors of Borided Steels. *Trans Indian Inst Met*, 69, 1169-1177. doi:<https://doi.org/10.1007/s12666-015-0698-2>
22. Toprak, M. (2019). Katı Borlamanın HARDOX 450 VE HARDOX HİTUF çeliklerinin yüzey özelliklerine etkisi. Urfa, Türkiye: Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı.

2. Bölüm

Derin Öğrenme ve Yapay Zekâ Tabanlı Öneri ve Görüntü İzleme Sistemlerinin Fiziksel Mağazalarda Müşteri Deneyimini İyileştirmedeki Etkisinin İncelenmesi

Beytullah BOZALI¹
Aleyna Nur ÇARKACI²

¹ Öğr. Gör. Dr.; Düzce Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mekatronik Mühendisliği Bölümü.
beytullahbozali@duzce.edu.tr ORCID No: 0000-0002-3633-5780

² Öğrenci; Düzce Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü.
aleynanurcarkaci@hotmail.com ORCID No: 0009-0006-4842-7494

ÖZET

Günümüzde hızla gelişen teknoloji, çevrimiçi platformlar üzerinden ihtiyaçların daha hızlı ve kolay bir şekilde karşılanmasını teşvik ederek fiziksel mağazaların cazibesini azaltmaktadır. Bu durum, mağazaların müşteri kaybını önlemek ve müşteri memnuniyetini sürdürülebilir kılmak için yenilikçi teknolojilerin entegrasyonunu zorunlu hale getirmiştir. Görüntü izleme ve öneri sistemleri, müşterilerin alışveriş alışkanlıklarını analiz etmek ve bu davranışları anlamlandırmak için mağazalara sunulan etkili yöntemlerdir. Bu sistemler, analiz edilen müşteri davranışlarını veriye dönüştürerek kişiselleştirilmiş önerilerde bulunur. Derin öğrenme, yapay zekâ ve makine öğrenmesi sayesinde, öneri sistemleri aracılığıyla doğru zamanda doğru ürünlerin müşterilere sunulması sağlanarak müşteri memnuniyeti ve satışlar artırılabilir. Öneri sistemlerine bağlam farkındalığının kazandırılması, bu sistemlerin etkinliğini daha da artırır. Bağlam farkındalığı; müşterinin ruh hali, yaklaşmakta olan etkinlikler, hava durumu ve mağazanın konumu gibi çeşitli çevresel faktörlerin de değerlendirilmesiyle oluşturulan önerilerin daha isabetli olmasını sağlar. Müşteri alışkanlıkları ve çevresel faktörler göz önüne alınarak gerçekleştirilen mağaza optimizasyonları, kişiselleştirilmiş bir alışveriş deneyimi sunarak müşterilere özel hissettirir. Müşterileri daha iyi tanımak ve hedef kitlelerine yönelik mağaza düzenlemelerini optimize ederek alışveriş deneyimlerinin kalitesini artırmak amacıyla makine öğrenmesi, derin öğrenme ve yapay zekâ teknolojilerinden nasıl faydalanabilecekleri incelenmiştir. Bu çalışmada, müşteri mahremiyetinin korunması amacıyla, derin öğrenme teknolojisi kullanılarak izleme sürecinde insan yüzlerinin otomatik olarak bulanıklaştırılması sağlanmıştır. Bunun yanı sıra, görüntü tanıma sisteminin, müşterinin incelediği ürünleri de tanıyabilmesi amacıyla hem insanları hem de ürünleri algılayacak şekilde tasarlanması gerekmektedir. Çalışmamızda, bu takip sürecinin izlenmesi ve müşterilerin bu sistemi kullanma rızasının alınması amacıyla bir mobil uygulama arayüzü tasarlanmış olup, bu uygulama aracılığıyla rızaya ilişkin geri bildirimlerin toplanması için anket çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak çalışma görüntü tanıma ve öneri sistemlerinin mevcut durumunu ve bu sistemlere getirilebilecek yenilikleri incelemiştir. Bu yeniliklerin uygulanması, müşteri memnuniyetini ve mağazalara olan müşteri bağlılığını artırmayı hedeflemektedir.

Anahtar sözcükler: Derin Öğrenme, Makine Öğrenmesi, Görüntü Tanıma, Veri Madenciliği, Öneri Sistemleri, Yapay Zekâ, Mağazacılık, Bağlam Farkındalığı

1. GİRİŞ

Görüntü izleme ve öneri sistemleri, müşterilerin alışveriş alışkanlıklarını analiz etmek, bu davranışları anlamlandırmak ve elde edilen verileri filtreleyerek kişiselleştirilmiş önerilerde bulunmak için mağazalara sunulan etkili yöntemlerdir. Verilerin filtrelendiği ve filtrelere dayanarak sağlanan seçim destekleri, büyük veri dünyasında önem arz etmektedir (Casillo et al., 2022). Filtrelenmiş seçim desteklerinin sağlandığı alanlardan biri, müşteri memnuniyetini ve satışları artırmayı hedefleyen perakende sektörüdür. Öneri sistemlerinin temelini oluşturan unsurlar; sistemin kullanıcıları, öneriye sunulan öğeler ve kullanıcı ile sistem arasındaki etkileşimlerdir. Bu unsurların etkileşimli analizi, kişiselleştirilmiş öneriler sunarak müşteri deneyimini optimize etmeyi ve ticari performansı yükseltmeyi amaçlamaktadır (Casillo et al., 2022). Çevrimiçi hizmetlerin ve bu hizmetlerin sunulduğu platformların hızla artması, bilgi aşırı yüklenmesi sorununa yol açarak müşterilerin ilgi duyabilecekleri ürünleri bulmalarını zorlaştırmaktadır (Cutolo et al., 2013). Bu sorunla başa çıkmak için çevrimiçi platformlar, öneri sistemleri gibi araçlar sunarak kullanıcı deneyimini geliştirmeyi amaçlamaktadır. Ancak, çevrimiçi platformların sunduğu öneri sistemleri, müşterileri fiziksel mağazalar yerine çevrimiçi alışverişe yönlendirmektedir. Çevrimiçi alışveriş sitelerine duyulan artan ilgi, bilim dünyasında müşterilerin alışveriş deneyimlerini iyileştirecek yollar ve modeller üzerine yapılan araştırmaları teşvik etmiştir. Kullanıcı özelliklerine göre optimize edilmiş alışveriş deneyimlerinin, satın alma oranlarını artıracağına dair çeşitli çalışmalar yapmışlardır (Bologna et al., 2013). Fiziksel mağazaların öneri sistemlerini benimsemeleri, çevrimiçi alışverişlerdeki artışlardan dolayı alışveriş deneyimlerinin kalitesini artırarak satışları yükseltebilir. Ancak, fiziksel mağazaların rekabet edebilmesi için çevrimiçi alışverişlerin sunduğu fırsatları da değerlendirmeleri gerekmektedir. Time dergisinin Temmuz 1998'de yayımlanan "Kiss Your Mall Goodbye: Online Shopping is Cheaper, Quicker and Better" başlıklı sayısında, alışveriş merkezlerinin geleceği hakkında endişeler dile getirilmiştir. Bu yayında, mağazaların yalnızca ürün çeşitliliği, uzun açılış saatleri ve uygun fiyatlarla varlıklarını sürdüremeyecekleri, çevrimiçi alışverişlerin sunduğu avantajların bu koşulları yetersiz kıldığı ifade etmişlerdir (Arnold & Reynolds, 2003). Öneri sistemlerinin dayandığı birkaç temel algoritma vardır, mağazacılık sektöründe özellikle kullanılan iki algoritmadan biri işbirlikçi filtrelemedir. İşbirlikçi filtrelemede, benzer zevklere sahip kişilerin ürün yorumları diğer kişilerin kararları üzerinde etkilidir. Bu filtrenin yoğun olarak kullanımı çevrimiçi alışveriş sitelerinde görülmektedir. Bir diğer algoritma ise içerik tabanlı filtrelemedir. İçerik tabanlı filtreleme ise kişisel zevklere dayanmaktadır. Kişisel zevklerin radikal değişiklikler göstermemesi fakat benzer

içeriklerle ilgilenilmesi bu filtrenin temel mantığı olduğunu ifade etmişlerdir (Erdeniz et al., 2020). Müşterilerin ürünlerle ilgilenme süreleri ve mağazada geçirdikleri vakit, ürün türüne göre farklılık gösterir. Örneğin, araba almak isteyen bir müşteri detaylı bilgiye ihtiyaç duyarken, çamaşır makinesi gibi ürünlerde daha kısa ve öz bilgi tercih edilebilir. Ayrıca, müşteri mağazada ne kadar uzun süre kalırsa, incelemenin ilerleyen aşamalarında daha kısa bilgi almak isteyebilir (Joerding, 1999). Müşterilerin ilgi süreleri, inceledikleri ürünler, mağazaya girdiklerinde yöneldikleri reyonlar ve mağaza içindeki hareketleri gibi verilerin analizi, mağazanın ihtiyaç duyduğu hedeflenmiş verilere ulaşmayı sağlar. Bu veriler, kişiselleştirilmiş hizmetlerin sunulmasına olanak tanıyarak müşteri deneyimini optimize edildiğini ifade etmişlerdir (Ghazanfar & Prügel-Bennett, 2014). Kişiselleştirilmiş hizmet sunulması hızla gelişen teknolojinin getirdiği bir avantaj olmanın yanı sıra artık bir ihtiyaç haline gelmiştir. Film, müzik, kitap öneri sistemlerinin de yaygınlaştığı ve insanların artık telefonlarından kişiselleştirilmiş deneyimleri birçok sektörde yaşamakta olduğunu vurgulamaktadırlar (Wang et al., 2018). Müşteriler, bazı deneyimleri eski usul bulabilir ve bu nedenle vazgeçebilirler. Bu bağlamda, fiziksel mağazalar yeni teknolojileri benimsemezse, terk edilebilecek deneyimlerden biri haline gelebilir. Çevrimiçi platformlardaki öneri sistemleri, müşterilerin ilgilerine göre kişiselleştirilmiş ürün listeleri sunarken, fiziksel mağazalardaki öneri sistemleri bu kadar kişisel olmayacağını vurgulamaktadırlar (Lops et al., 2011). Fiziksel mağazalar, hedef kitlelerinin ortalama beğenilerine göre optimizasyon yaparken, öneri sistemleri internet alışverişi, müzik, kitap ve film platformlarında daha yaygındır. İnternet sitelerindeki öneri sistemleri, kullanıcı ve ürün sayısının hızla artmasıyla risk taşır; önerilerin kalitesi düştüğünde, müşteriler bu sitelerle olan bağlarını koparabilir olduğunu ifade etmişlerdir (Kumar et al., 2014). Fiziksel mağazalarda bu riskin, müşterilerin ilgisinin ortalamasının alınması sebebiyle daha düşük olduğu söylenebilir. Geçmiş 29 yılı aşkın öneri sistemleri; Netflix, Amazon gibi çapı geniş pazarlar sayesinde yüksek bir ilginin odağı olmuş ve birçok sektörde de hızlıca yerini almaya başladığını ifade etmişlerdir (Ko et al., 2022). Fiziksel mağazalarda da bazı firmalar, öneri sistemleri gibi hizmetleri sunmaya başlamış ve bu alanda yer edinmiştir. Bu hizmetler, müşteri ilişkilerini geliştirmek ve memnuniyetsizlik yaratan durumları ortadan kaldırmak açısından büyük önem taşıdığı vurgulanmıştır (Burucuoğlu, 2011). Bu hizmetten yararlanan markalar, sektörlerinde ön plana geçebilmek için alışveriş esnasında ve alışverişten sonra müşteri memnuniyetine odaklanan uygulamalar yapmaktadırlar ve mağaza deneyimine getirdikleri yenilikler aracılığıyla rakiplerine üstünlük sağlamakta olduğunu belirtmiştir (Bozpolat, 2017). Mağazalar, yalnızca perakendecilerle değil, online alışveriş siteleriyle de rekabet

ederken, müşterilerin sosyal ihtiyaçlarını da dikkate alarak hoş bir alışveriş deneyimi sunarak rekabette öne geçebilirler (Karakaşoğlu & Arslan, 2016). Mağazalarda uygulanacak görüntü izleme ve öneri sistemlerinin, mağaza atmosferini etkileyeceği kesindir. Mağaza atmosferinin, müşterilerin psikolojisi üzerinde etkili olduğu ve satın alma kararlarını doğrudan etkilediği ifade etmişlerdir (Yücel & Yücel, 2012).

Çalışmamızın ana katkısı, fiziksel mağazaların müşteri deneyimini iyileştirmek ve müşteri bağlılığını artırmak amacıyla derin öğrenme, yapay zekâ ve makine öğrenmesi teknolojilerini kullanarak öneri ve görüntü izleme sistemlerini entegre etme yöntemlerini incelemektir. Özellikle, bu sistemlerin bağlam farkındalığı ile zenginleştirilmesi, müşteri mahremiyetinin korunması için yüz bulanıklaştırma gibi güvenlik önlemlerinin alınması ve müşterilerin bu teknolojilere rızasını sağlamak için bir mobil uygulama arayüzü geliştirilmesi, çalışmanın önemli katkılarından biridir. Ayrıca, müşteri alışkanlıkları ve çevresel faktörleri dikkate alan kişiselleştirilmiş alışveriş deneyimlerinin nasıl optimize edileceği konusunda öneriler sunulmaktadır.

2. MATERYAL VE METOD

Bu çalışmada, fiziksel mağazacılıkta müşteri deneyimini iyileştirmek ve müşteri bağlılığını artırmak amacıyla derin öğrenme, yapay zekâ ve makine öğrenmesi teknolojilerini kullanarak öneri ve görüntü izleme sistemlerinin entegrasyonu üzerine odaklanılmıştır. Çalışma, bağlam farkındalığı olan öneri sistemleri, veri madenciliği, güvenlik kameralarına entegre süreçler ve kişisel verilerin korunmasına yönelik önlemler ile bu teknolojilerin fiziksel mağazalarda uygulanabilirliğini incelenmektedir. Ayrıca, müşterilerin bu teknolojilere rızasını sağlamak amacıyla mobil uygulama arayüzü geliştirilmiştir.

2.1. Görüntü Tanıma

Gelişen teknolojiyle birlikte, yapay zekâ kullanılarak görüntülerdeki nesnelerin tanımlanması ve sınıflandırılması, görüntü tanıma olarak adlandırılan bir süreçle mümkün hale gelmiştir. Görüntü tanıma, yapay zekâ algoritmalarının kullanımıyla görsel verilerdeki nesnelerin otomatik olarak tespit edilmesi ve kategorize edilmesi sürecidir (Evatro, 2024). Görüntü tanıma, hem karmaşık sistemlerin bir bileşeni olarak kullanılabilir hem de günlük basit ihtiyaçları karşılamak üzere uygulanabilir (Woods, 2022). Bu teknoloji, çeşitli sektörlerde de hızla yerini almıştır. Güvenlik sistemleri, araç takibi ve mağazalar bunlardan birkaçıdır (Sonsuz Bilgi, 2024).

Görüntü tanıma teknolojisi, mevcut sistem ve sektörlere entegre edilebildiği gibi, yeni ortaya çıkan ihtiyaçları da karşılamakta oldukça etkilidir. Örneğin, 2019 yılında yaşanan pandemide, maske takan ve takmayan kişilerin tespit edilerek maskesiz kişilere cezai işlemler uygulanmasını sağlamak amacıyla geliştirilen görüntü tanıma sistemleri, bu yeni sağlık krizinin yönetilmesine yardımcı olmuştur. Bu uygulama, görüntü tanımının yeni ve acil durumlarda nasıl kullanılabilmesine dair bir örnek teşkil etmektedir (Devdiscourse, 2024; Yapay Zekâ ve Teknoloji Derneği, 2021). Görüntü tanıma, bilgisayarın görseldeki her bir pikseli analiz etmesi ve bu süreçte makine öğrenmesi ile derin öğrenmeden yararlanılması sonucu gerçekleşir (Kejriwal, 2023)). Görüntü sisteminin kullanılmak istendiği amaca bağlı olarak makine öğrenmesi ve derin öğrenmenin farklı özelliklerinden de yararlanılabilir. Bunlar makine öğrenmesi için: geliştirilmiş karar verme yetenekleri, kalıpları tespit etme ve tahminde bulunma yeteneği (Barraza Carlos, 2024); derin öğrenme için ise tanınan insan yüzünü otomatik olarak bulanıklaştırma olarak örneklenebilir. Mağazalarda kullanılan “müşteri memnuniyeti yöntemleri” arasında görüntü tanıma teknolojisinin çeşitleri kullanılmakta olup makine öğrenmesi ve derin öğrenmenin getirdiği avantajlarla bu yöntemler geliştirmeye açık haldedir (Evatro, 2024; Alemdar, 2019).

2.2. Mağazacılıkta Görüntü Tanıma ile Öneri Sistemlerine Genel Bakış

Mağazalarda müşteri memnuniyeti ve satışları artırmak üzere çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bunlar: gizli müşteriler (Karan, 2014), sadakat programları (Şimşek, 2023), kuponlar, memnuniyet anketleri (Doğan, 2024) ve görüntü izleme ile elde edilmiş verilerin yorumlanması sonucu öneriler olarak sıralanabilir. Görüntü izleme, hızlı ve yoğun veri elde edilen bir yöntemdir; örneğin, Amazon'un kasasız alışveriş sistemi, müşterilerin markete girişte tanınmasını, içerdeki hareketlerinin kameralarla izlenmesini ve ürünlerin sepetine eklenip çıkarılmasını tespit ederek, marketten çıkışta otomatik ödeme yapılmasını sağlar (Pazarlamasyon, 2018). Amazon bu görüntü izleme sistemini kendi kullanımına yönelik geliştirmiştir; diğer markalar ise benzer hizmetleri sağlayan firmalarla çalışarak mağazaya girişte müşteri tanıma, ürün yönelimi, mağaza içindeki süre, ürün inceleme süresi ve stok takibi gibi çeşitli veriler elde etmektedir (Evatro, 2024). Görüntü tanıma yoluyla elde edilen veriler, makine öğrenmesi ve derin öğrenme algoritmaları ile analiz edilip uzmanlar tarafından yorumlandığında, mağazacılıkta önemli kazançlar sağlanabilir. Bu nedenle, görüntü tanıma ve öneri sistemleri sunan firmalar markalar tarafından yoğun talep görmekte ve mevcut sistemlere yapılacak eklemelerle veri miktarı artırılarak satışlar ve müşteri memnuniyeti başarıları yükseltilebilir.

2.3. Bağlam Farkındalığı Olan Öneri Sistemleri

Kullanıcıların sistemle ilişkisini etkileyebilecek herhangi bir faktörü tanımlamak amacıyla yararlı olan bilgiler bağlam olarak ifade edilmektedir (Casillo et al., 2022). Bağlam farkındalığına sahip öneri sistemlerini anlamak için, öncelikle bağlam farkındalığı kavramını derinlemesine kavramak gerekir. Bağlam, dört ana sınıflandırıcıya ayrılabilir: bireysel, konum, zaman, aktivite ve ilişkisel bağlam. Bireysel bağlam, kullanıcılar ve öğelerle ilişkili bilgileri içerirken, konum, bir varlığın fiziksel yerini belirtir; zaman, belirli bir dönem veya anı ifade eder; aktivite, varlıkların gerçekleştirdiği eylemleri tanımlar ve ilişkisel bağlam, sosyal veya iş gücü bağlamında öğeler arasındaki ilişkileri belirtir. Bu bağlam türleri, belirli uygulama alanlarına göre özelleştirilebilir; örneğin, bir müzik uygulaması, cihaz özellikleri ve müzik türüne odaklanarak önerilerde bulunabilir (Casillo et al., 2022; Tr.Books-Kingdom, 2024). Öneri sistemleri, belirli bir bağlamda kullanıcı hedeflerine sistematik olarak önerilerde bulunmak için kullanılır. Araştırmalar, bağlamsal bilgilerin e-ticaret kişiselleştirmesi, bilgi erişimi ve diğer alanlarda önemli olduğunu göstermekte, ancak mevcut yöntemlerin çoğu, kullanıcılar için en uygun öğeleri önermeye odaklanırken zaman, mekân ve sosyal etkileşim gibi bağlamsal faktörleri yeterince dikkate almamaktadır (Ricci et al., 2011).

2.4. Makine Öğrenmesi ve Görüntü Tanıma

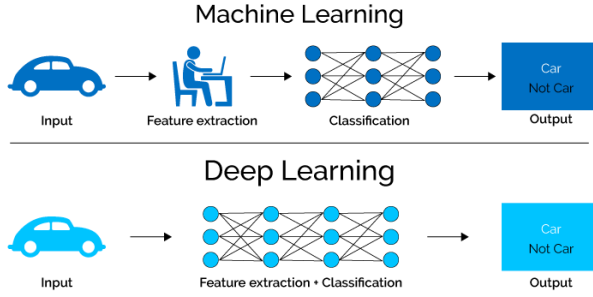
Makine öğrenmesi, veri setlerini analiz ederek ve algoritmalar kullanarak insanların öğrenme süreçlerini taklit eden bir yapay zekâ dalıdır (Ozkan, 2022). Makine öğrenmesi, önceki deneyimlerden elde edilen bilgileri kullanarak öğrenme süreçlerini geliştirir ve yeni öğrenimleri mevcut bilgilerin üzerine inşa eder. Makine öğrenmesi iki ana kategoriye ayrılabilir:

Denetimli Öğrenme: Bu yöntem, etiketlenmiş veri kümesi kullanarak modelin eğitilmesi ve test edilmesi yoluyla daha doğru sınıflandırma sonuçları sağlar. Ancak, düşük veri kalitesi ve yetersiz eğitim verileri gibi dezavantajlar taşıyabilir (Mahadevkar et al., 2022; Bulutistan, 2022).

Denetimsiz Öğrenme: Bu yaklaşım, modellerin etiketlenmemiş ham veriler üzerinde eğitilmesini içerir ve genellikle veri setlerinde mevcut yapı ve desenleri keşfetmek için kullanılır. Makine öğrenmesi, mağazalarda güvenlik kameralarına entegre edilen görüntü tanıma sistemlerinde insan davranışlarını öğrenme yeteneğine sahiptir. Bu teknoloji, müşterilerin alışveriş alışkanlıklarını analiz ederek mağaza sahiplerine ürün yerleşimi, stok yönetimi ve diğer konularda önerilerde bulunabilir. Ayrıca, makine öğrenmesi veri kümeleme, tahmin yapma ve veri setlerini hızlı işleme gibi işlevlerle, görüntü tanıma ve öneri sistemlerinde etkili bir şekilde kullanılabilir.

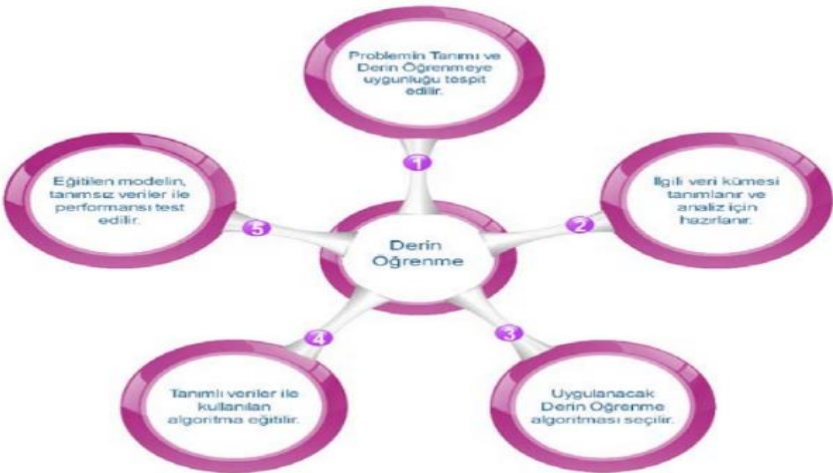
2.5. Derin Öğrenme ve Görüntü Atanma

Derin öğrenme, makine öğreniminin bir alt dalı olarak, çok katmanlı yapay sinir ağlarıyla büyük veri setlerindeki karmaşık ilişkileri modellemeye odaklanır. Biyolojik sinir sistemlerinden ilham alan bu yöntem, görüntü tanıma, ses işleme ve doğal dil işleme gibi alanlarda yüksek performans göstererek, yapay zekâ uygulamalarında devrim niteliğinde ilerlemeler sağlamaktadır (Şimşek, 2019). Şekil 1'de, derin öğrenme ve makine öğrenmesinin karşılaştırmalı bir incelemesi sunulmaktadır (Bükülmez, 2023).



Şekil 1: Derin öğrenme ve makine öğrenmesinin karşılaştırmalı gösterimi

Derin öğrenme, bilgisayarların deneyimlerden öğrenerek dünyayı anlamlandırmasını sağlayan bir makine öğrenmesi yöntemidir. Görüntü tanıma ve öneri sistemlerinde, insan yüzünü tanıyıp otomatik olarak bulanıklaştırma gibi ek avantajlar sunar (Todt et al., 2022).



Şekil 2: Derin öğrenme süreçlerinin gösterimi

Şekil 2’de Derin öğrenme süreçleri gösterimi verilmiştir (Kayaalp & Süzen, 2018). Mağazadaki siyah-beyaz kameralar için derin öğrenme, görüntü tanıma entegrasyonunda çözümler sunabilir. Örneğin, derin öğrenme siyah-beyaz görüntülerin renklendirilmesi ve düşük çözünürlüklü görüntülerin kalitesinin artırılmasında kullanılabilir (Elaraby et al., 2021). Şekil 3’te, derin öğrenme kullanılarak renksiz fotoğrafların renklendirilmesi gösterimi verilmektedir (Hadad, 2017).



Şekil 3: Derin öğrenme ile renksiz fotoğrafların renklendirilmesi

Şekil 4’te, derin öğrenme yöntemi kullanılarak düşük çözünürlüklü bir fotoğrafın çözünürlüğünün artırılması gösterimi verilmektedir (Hadad, 2017).



Şekil 4: Derin öğrenme ile düşük çözünürlüklü fotoğrafların çözünürlüğünün artırılma örnek gösterimi

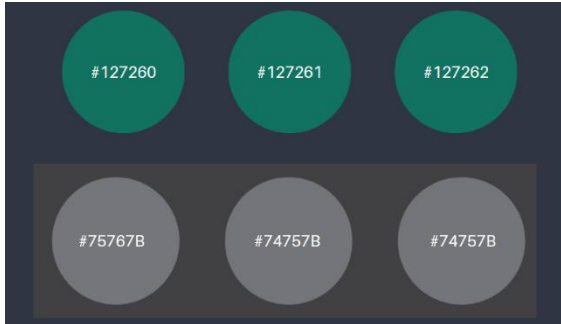
2.6. Veri Madenciliği

Veri madenciliği, özellikle satış ve pazarlama alanlarında öne çıkan bir disiplin olmakla birlikte, çok çeşitli sektörlerde geniş bir kullanım yelpazesi sunmaktadır (Mysoft, 2024). Veri madenciliği, verilerin belirli amaçlar doğrultusunda analiz edilmesi ve anlamlandırılması sürecidir. Müşteri segmentasyonu, tercih analizi, risk tespiti ve ürün stratejileri gibi alanlarda önemli bir rol oynar. Makine öğrenimi ve yapay zekâ teknolojilerinin gelişimiyle birlikte veri madenciliğinin etkisi ve kullanım alanları genişlemiştir. (Bulutistan, 2023). Veri madenciliğinde veriler iki farklı yöntemle toplanabilir: Açık Veri

Toplama: Kullanıcının bilinçli olarak paylaştığı ve paylaşmayı kabul ettiği verilerin toplanması. Kapalı Veri Toplama: Kullanıcının farkında olmadan ilgilendiği ürünler ve alışveriş davranışlarına ilişkin verilerin toplanması (Kamaşoğlu, 2020). Veri madenciliği, görüntü tanıma ve öneri sistemleri gibi alanlarda, makine öğrenmesi, derin öğrenme ve yapay zekâ ile entegre edilerek daha kapsamlı ve zengin veri analizleri sağlamıştır.

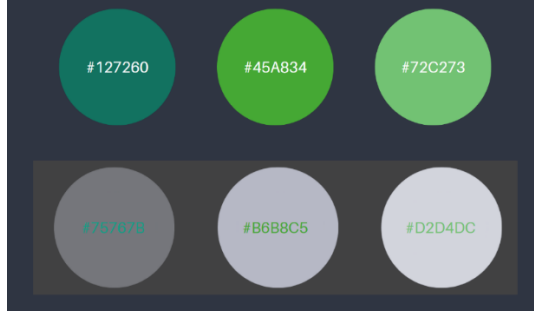
2.7. Güvenlik Kameralarına Entegre Süreci

Mağazalara ek bir maliyet yüklemeyen mevcut güvenlik kameralarına entegre edilebilecek bir sistem, mağaza sahiplerinin görüntü tanıma ve öneri sistemlerini tercih etme sebeplerinden biri olabilir. Ancak, bu durum akla şu soruyu getirmektedir: Ürün tanıma özelliği, renk ve desen gibi spesifik ürün özelliklerini ayırt edebilme kapasitesine sahip olmalıdır. Siyah-beyaz güvenlik kameraları kullanan mağazalarda bu sistem uygulanabilir mi? Siyah-beyaz kameralarda ürünlerin belirgin özelliklerinin tespit edilmesi ve daha fazla veri elde edilmesi için bir çözüm olarak, renklerin siyah-beyaz görüntülerdeki ton farklılıklarından yararlanılabilir. Bu çözüm, şu şekilde açıklanabilir: Renkler, kamera görüntüsünde siyah ve beyaz tonlarında görünebilir; ancak bir ürünün gerçek rengine bağlı olarak oluşan siyah veya beyaz ton, başka bir rengin oluşturduğu tonla aynı değildir. İnsan gözünün ayırt edemeyeceği kadar yakın tonlar görülebilse de renk kodları arasında belirgin farklılıklar oluşacaktır. Mavi, kırmızı ve yeşil renklerinin her biri 256 renk değerine sahiptir ve her bir değer 256 farklı şekilde kullanılabilir. Bu işlemi basit bir formül ile göstermek gerekirse: $256 \times 256 \times 256 : 16.777.216$ farklı renk. Elde edilen sayıya göre RGB renk kodlaması ile sonsuz renk elde edilebilir olduğunu ifade etmiştir (Elele, 2022)(26). Şekil 5'te, kod olarak yalnızca tek haneli farklılıklara sahip ve birbirine yakın olan üç renk ile bu renklere uygulanan siyah-beyaz filtre sonuçları gösterilmektedir.



Şekil 5: Kod olarak tek haneleri farklı birbirine yakın 3 renk ve uygulanan siyah-beyaz filtre

Üç renkten biri, makine tarafından doğru tespit edilirken, diğer iki renk için hatalı sonuçlar elde edilmiştir. Bu deney, basit imkanlarla gerçekleştirilmiş olmasına rağmen, hassas renk farklarının doğruluk ve hata payını belirlemeye yönelik yapılmıştır.



Şekil 6: Aynı rengin farklı tonları ve uygulanan siyah-beyaz filtre

Şekil 6'da aynı rengin (yeşil) farklı tonlarının siyah-beyaz filtre altında kolaylıkla ayırt edilebildiği gösterilmektedir. Bu durum, mağazalardaki ürünlerin renk farklarının, hata payı göz önünde bulundurularak, görüntü tanıma sistemleri tarafından yüksek doğrulukla tespit edilebileceğini ortaya koymaktadır (Kanan et al., 2010). Bu bağlamda, yapılması gereken, renklerin siyah-beyaz filtre uygulandığında ortaya çıkan tonları ile gerçek renkleri arasındaki eşleşmenin makineye öğretilmesidir.

2.8. Kişisel Verileri Koruma Kanunu

Görüntü tanıma ve öneri sistemleri gündeme geldiğinde, sıklıkla tartışılan sorulardan biri de "Kişisel Verileri Koruma Kanunu ihlal ediliyor mu?" sorusudur. Bu sorunun yanıtlanabilmesi için çeşitli yaklaşımlar ve kanuna uyum sağlamak için alınabilecek birkaç önlem bulunmaktadır. Kişisel veri, bir bireyi doğrudan veya dolaylı yoldan tanımlayan bilgilerdir. Bu, sadece ad, soyadı, şehir gibi doğrudan tanımlayıcı bilgilerle sınırlı olmayıp, kişinin belirlenebilirliğini sağlayan her türlü bilgi kapsamına girer (Özdarendeli, 2023). Görüntülerin bulanıklaştırılması ve alışveriş davranışlarının izlenmesi, kişiyi doğrudan veya dolaylı olarak tanımlamadığı için kişisel veri kapsamına girmez. Mağaza, kasada fatura kesme sırasında kişisel veriler için gerekli izinleri almaktadır, bağımsız olarak görüntü izleme ve öneri sistemleri kullanılsa da kullanılsa da. Ayrıca, görüntü izleme ve öneri sistemleri kullanılmıyorsa, mağaza içi güvenlik kameraları tarafından zaten izlenen görüntüler üzerinden bu sistemler kurulabilir ve ek bir görüntü alınmasına gerek kalmaz. Kişisel Verilerin Korunması Kanunu'nun ikinci bölümünde, kişisel verilerin işlenmesi ile ilgili olarak Madde

4, c) bendinde belirtilen ilkeye göre, verilerin işlenmesi belirli, açık ve meşru amaçlara yönelik olmalıdır. Bu çerçevede, satışları artırma ve mağaza optimizasyonu gibi amaçlar, meşru amaçlar arasında yer almaktadır (Kişisel Verilerin Korunması Kanunu, 2016). Bu bilgiler ışığında, mağaza aşağıdaki önlemleri alabilir:

Uyarı İmgeleri: Mağaza, müşteri memnuniyetini sağlamak amacıyla çalışma saatleri boyunca izlendiğini belirten bir uyarı levhası yerleştirebilir. Bu tür bir uyarı, örneğin "Mağazamız, müşteri memnuniyeti amacıyla çalışma saatleri içerisinde izlenmektedir" şeklinde olabilir ve şekil 7'de örneği gösterilmiştir.



Şekil 7: Mağaza içine asılabilecek uyarı örneği

Blurlama: Derin öğrenme tekniklerinden yararlanarak, sistemlerin insan yüzlerini tanıdığı anda otomatik olarak bulanıklaştırma (blurlama) işlemi gerçekleştirmesi sayesinde, bireylerin yüzleri tanımlanamaz hale getirilir. (Todt et al., 2022). Blurlama işleminin bir örneği Şekil 8'de gösterilmektedir.



Şekil 8: Otomatik blurlama örneği



Şekil 9: Onay iletilisinin temsili örneği

Onay İletisi: Kasada fatura kesme işlemlerinde, istenilen bilgilerin doğruluğunu teyit etmek için alınan onay iznini ifade eder. Onay İletisinin bir örneği Şekil 9'da sunulmuştur.

3. PROJENİN TASARIMI VE ALINAN SONUÇLAR

Bu çalışmanın ana amacı, fiziksel mağazaların müşteri deneyimini iyileştirmek ve müşteri bağlılığını artırmak için derin öğrenme, yapay zekâ ve makine öğrenmesi teknolojilerini öneri ve görüntü izleme sistemlerine entegre etme yöntemlerini incelemektir. Özellikle, bağlam farkındalığı ile zenginleştirilmiş sistemlerin, müşteri mahremiyetini korumak için yüz bulanıklaştırma gibi güvenlik önlemleri ve müşterilerin bu teknolojilere rızasını sağlamak için bir mobil uygulama arayüzü geliştirdik. Ayrıca, müşteri alışkanlıkları ve çevresel faktörleri göz önünde bulundurarak kişiselleştirilmiş alışveriş deneyimlerinin nasıl optimize edilebileceği hakkında öneriler sunulmaktadır. Çalışmamız, fiziksel mağazaların müşteri deneyimini iyileştirmek ve müşteri bağlılığını artırmak amacıyla bu teknolojileri kullanarak öneri ve görüntü izleme sistemlerini nasıl entegre edebileceğini incelemekte ve bu alandaki yenilikleri ele almaktadır.

3.1. Bağlam Farkındalığı Olan Görüntü Tanıma Destekli Öneri Sistemleri: Yeni Nesil Mağazacılık Çözüm Önerileri

Görüntü tanıma, mevcut güvenlik kameralarına entegre edilerek mağazaların yeni kamera yatırımlarına gerek kalmadan kullanılabilen bir yöntemdir. Bu sistemle, mağazaya giren müşteriler tanınarak bir ID atanır ve müşterinin hareketleri, ilgi alanları ve ürün etkileşimleri gibi veriler toplanır. Derin öğrenme kullanılarak, müşteri yüzleri otomatik olarak bulanıklaştırılır. Ürün tanıma, ürünlerin ilgi çekici özelliklerini belirleyerek, dikkat çeken ortak özelliklerin verilerini sağlar. Alışveriş tamamlandığında, müşteri ID'si ve fatura bilgisi eşleştirilir, böylece müşteri tekrar mağazaya girdiğinde önceki verilerle birlikte yeni veriler toplanarak ID üzerinde birleştirilir. Müşterinin fatura bilgileri ile kamera görüntülerindeki ID bilgisinin eşleştirilmesinde, fatura bilgilerinin niteliği ile ilgili bazı sorular gündeme gelebilir. Ancak, görüntü tanıma ve öneri sistemlerinin entegrasyonu, istenen fatura bilgilerinde herhangi bir değişiklik gerektirmez. İletişim bilgileri (telefon numarası, e-posta) ve isim bilgileri, görüntü tanıma ile öneri sistemlerinde ID ile eşleştirmek için yeterli olmaktadır. Toplanan veriler ile elde edilebilecek bilgiler aşağıdaki şekilde sıralanabilir:

Ürünlerin Yerinin Optimizasyonu: Ürünlerin konumlandırılması, birlikte satın alınma olasılığını artırabilir; dikkat çekici ürünler mağaza girişine yakın yerleştirilebilir; farklı kullanım tarzlarına sahip ortak ürünlerin etrafına benzer tarzda ürünler yerleştirilebilir ve müşterilerin aradıkları ürünlerin yerleri optimize edilebilir.

Ürün Çeşitliliği: Müşterilerin beğendiği ürünlerin varyasyonları artırılabilir; dikkatlerini çeken ürünlerin tasarımlarındaki ortak unsurlar yeni ürünlerde kullanılabilir.

Mağaza İçi Yollarının Optimizasyonu: Mağaza içindeki sıkışıklık yaşanan alanlar için optimizasyon stratejileri geliştirilebilir.

Müşterilerin Mağazada Geçirdiği Süre: Müşterilerin mağazadaki vakitlerini artırmak için, ilgilerini çekebilecek reyonlar çoğaltılabilir veya stratejik ürün yerleşimleri ile mağaza içinde dolaşım süreleri uzatılabilir. Ayrıca, mağaza sahipleri bu verilerle stratejik hedefler belirleyebilir.

Mağazaya Uğrayan Müşteri Sayısı: Mağazaya gelen müşteriler ile alışveriş yapan müşteriler arasındaki oranlar karşılaştırılarak, alışveriş yapmaya teşvik edilen ve edilmeyen müşteri oranları belirlenebilir.

3.2. Yeni Nesil Mağazacılık Çözümlerine Getirilebilecek Yenilikler

Görüntü tanıma ve öneri sistemleri, çeşitli markalar tarafından kullanılmakta olup, bu hizmeti sağlayan firmaların hizmet kapsamı genişletilebilir ve elde edilen veriler artırılabilir. Örneğin:

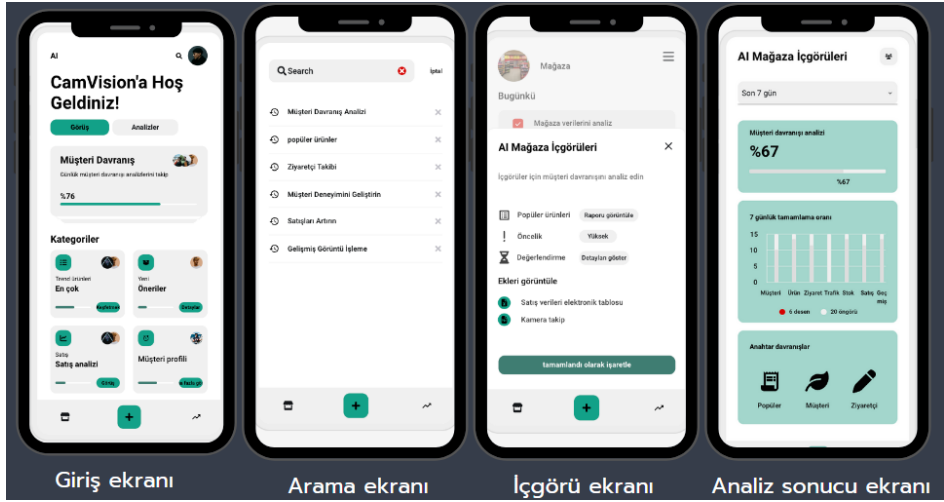
ID Sistemi: Mevcut görüntü tanıma ve öneri sistemleri, mağazaya giren müşterilere bir ID atayarak bu bilgiyi fatura bilgileri ile eşleştirmeyi içermemektedir. Ancak, eğer bu ID sistemi fatura bilgileriyle eşleştirilirse, müşterinin tüm alışveriş verileri ve alışveriş alışkanlıkları detaylı bir şekilde toplanabilir.

Tarz Tanıma: Görüntü tanıma teknolojileri, müşterilerin tarzlarını makine öğrenmesi ve derin öğrenme yöntemleriyle tanımlayıp sınıflandırabilir. Bu sayede, benzer tarz ve ürünler öğrenilerek müşterilerin kıyafetleri de sınıflandırılabilir, böylece mağazaların hitap ettiği kitlenin tercihleri hakkında daha fazla veri elde edilebilir. Mevcut hizmetler bu özelliği içermemekte olup, müşteri tanıma ve memnuniyeti üzerinde olumlu etkiler sağlayabilir. Mağaza ve marka performansı, verilerin analizi, teknolojinin etkin kullanımı, müşteri geri bildirimleri ve hizmet kalitesi gibi kriterlerle değerlendirilmektedir (Eroğlu, 2005).

Kabin Sistemi: Kabin sistemleri, ürünleri tanıyabilen sensörler ile donatılabilir. Bu sensörler, kabine giren ürünlerin türünü ve giriş sayısını takip ederek, denenen ancak satın alınmayan ürünlerin verilerini sağlar. Kasalarda satış verileri mevcut olsa da beğenilip denendikten sonra alınmayan ürünlerin sayısı ve oranı hakkında bilgi mevcut değildir. Bu veriler, ürünler hakkında geri dönüş sağlayarak beğenilme ve deneme oranı yüksek ürünlerin kalite sorunlarını işaret edebilir. Böylece, firma bu ürünleri inceleyebilir ve gerekli üretim ya da tasarım

değişikliklerini yapabilir. Sensörlü kabin sistemleri, mevcut mağazacılık uygulamalarında henüz yaygın olarak kullanılmamaktadır.

Mobil Uygulama Arayüzü: Mağaza sahiplerinin gün içindeki mağaza hareketliliğini izlemeleri için bir mobil uygulama geliştirilmesi önerilebilir. Bu uygulama, mağaza sahiplerine verilerin erişimini kolaylaştırarak, gerçek zamanlı veri analizi ve yönetiminde etkinlik sağlar. Çalışmamızda, makine öğrenmesi, yapay zekâ ve derin öğrenme teknolojileri kullanılarak Şekil 10'da gösterilen Mobil Uygulama Arayüzü tasarlanmıştır.



Şekil 10: Projede tasarlanan mobil uygulama arayüzünün görseli

Bağlam farkındalığı içeren öneri sistemlerinin avantajlarından biri hava durumu bilincidir. Aylık veya haftalık hava durumu verileri, öneri sistemlerinin mağazadaki ürün yerleşimini optimize etmesine olanak tanır. Bölgesel hava değişiklikleri, aynı markanın farklı mağazalarında ürün yerleşiminde farklılık yaratabilir, bu da öneri sistemlerinin bölgesel veri kullanarak optimize edilmiş öneriler sunmasını sağlar. Duygusal analiz de öneri sistemlerine entegre edilebilir. Müşterilerin mağazaya girişteki duygusal durumlarının analizi, hangi ruh halindeki müşterilerin hangi ürünleri tercih ettiği hakkında bilgi sağlayabilir. Bu bağlamda, öneri sistemleri daha işlevsel hale gelir ve çeşitli durumlara uygun öneriler sunabilir. Ek olarak, müşteri profili (yaş, şehir, konum), trendler ve yaklaşan etkinlikler gibi faktörler de öneri sistemlerine entegre edilebilir. Bu şekilde, ID sistemleri, kabin sistemleri, ürün tanıma, tarz tespiti, mobil uygulama arayüzü ve hava durumu bazlı ürün yerleşimi optimizasyonları ile mevcut görüntü tanıma ve öneri sistemleri daha ileri bir düzeye taşınabilir.

3.3. İnternet Alışverişlerinde Müşteriyi Tanımının Getirdiği Avantajlar

Fiziksel mağazalar için tasarlanan görüntü tanıma ve öneri sistemlerinin benzer işlevlerini yerine getiren bir sistem, internet mağazacılığı ve alışveriş siteleridir. Bu dijital platformlar, kullanıcıları fiziksel mağazalardan daha etkili bir şekilde tanıyabilir. İnternet mağazaları, müşterilerin incelediği ürünlerin verilerini kaydeder ve benzer zevklere sahip diğer ürünleri önerir veya kullanıcıya ilgi duyduğu ürünlerin alternatiflerini sunar. Ayrıca, müşterilerin ziyaret ettiği ürünlerle ilgili reklamlar farklı sitelerde gösterilebilir. Satışları artırmak ve müşteri etkileşimini güçlendirmek amacıyla, alışveriş siteleri çeşitli bildirimler gönderir; örneğin, "sepetinizde ürün var" hatırlatmaları veya ürün indirimleri hakkında bilgilendirmeler yapar. Müşteriler internet üzerinden alışveriş yaparken, alışveriş siteleri ve uygulamaları yalnızca ürün bazlı verileri değil, aynı zamanda fare hareketleri gibi etkileşim verilerini de kaydeder. Bu kapsamlı veri toplama, müşterinin tercihleri hakkında daha derinlemesine bilgi sağlar. Sonuç olarak, bu sistemler, müşterilere daha kişiselleştirilmiş öneriler sunarak alışveriş deneyimini iyileştirir ve hoşlanılan ürünlerin benzerlerini önererek satışları artırır (Örcün et al., 2019). Birçok uygulamanın amacı, kullanıcıları platformlarında daha uzun süre tutmaktır; örneğin, müzik uygulamaları benzer şarkılar, video platformları ise ilgi alanına uygun videolar önerir. Kullanıcıların zevklerine göre özelleştirilmiş öneriler sunan platformlar, bağlam farkındalığı sayesinde kullanıcıların değişen tercihlerini öğrenir ve algoritmalarını optimize eder. Bu bağlam farkındalığı, çevrimiçi alışveriş platformlarında kullanıcıların daha fazla vakit geçirmesini sağlar ve aynı yaklaşımın fiziksel mağazalarda da uygulanması, mağazada geçirilen süreyi artırabilir. Bağlam farkındalığı ile çalışan öneri sistemlerinin hem müşteri hem de marka memnuniyetini artırarak fiziksel mağazalarda da başarılı sonuçlar vermesi beklenmektedir.

3.4. Yeni Nesil Mağazacılığın Çıkış Noktası

Verinin giderek artan değeri, veri toplama yöntemlerini de kritik hale getirmektedir. İnternet alışverişi örneğinde olduğu gibi, markalar müşteri memnuniyetini artırmak için kişiselleştirilmiş öneriler sunarak alışveriş sürecini iyileştirmekte ve kullanıcı etkileşimini artırmaktadır. Benzer şekilde, fiziksel mağazalarda da müşteri odaklı ürün ve yerleşim optimizasyonları veriler aracılığıyla gerçekleştirilmektedir. Örneğin, birkaç yıl önce mağaza girişlerinde kullanılan alarm sensörleri, müşteri giriş-çıkışlarını saymakta ve çalışanlar bu sensörlerin kendilerini saymaması için eğilerek geçmekteydi. Bu durum, verinin önemini ve markaların veriye olan odaklanmasını gösterir. Görüntü tanıma ve öneri sistemleri de bu veri odaklı yaklaşımın bir sonucudur.

3.5. Müşteri Memnuniyetinin Önemi

Müşteri memnuniyeti, bir markanın sürdürülebilir başarısı için kritik bir unsurdur. Memnun kalan bir müşteri, mağazayı yeniden ziyaret etme ve zamanla marka sadakati geliştirme eğilimindedir. Bu süreç, müşterinin markaya yönelik duygusal bağlılığını pekiştirir. Memnuniyetini çeşitli platformlarda ifade eden müşteri, mağazanın tanınırlığını artırarak, potansiyel müşteri kitlesini genişletir ve dolayısıyla satışların artmasına katkıda bulunur (Doğan, 2024). Müşteri memnuniyetinin yüksek olması, markaların prestijini artırarak rekabet avantajı sağlamalarına olanak tanır ve yeni müşteriler tarafından tercih edilme olasılığını yükseltir. Müşteri sadakatının uzun vadeli olarak sürdürülmesi ve şikayetlerin etkin bir şekilde yönetilmesi için geliştirilen stratejiler kritik bir öneme sahiptir (Burucuoğlu, 2011). Ayrıca, hızla gelişen teknoloji sayesinde öneri sistemlerinin kullanımı, bu stratejilerin etkinliğini artırmada etkili bir çözüm olarak öne çıkmaktadır.

3.6. Çalışma Kapsamında Yapılan Müşteri Rıza Anketi ve Sonuçları

Görüntü tanıma tabanlı öneri sistemleri, müşterilerin bu tür sistemlere rıza gösterip göstermeyeceklerine dair önemli etik soruları gündeme getirmektedir. Bu soruları değerlendirmek amacıyla, 6 Mayıs 2024 tarihinde 127 katılımcıyla gerçekleştirilen bir anket çalışması yapılmıştır. Anketin uygulanması esnasında, katılımcılara görüntü tanıma ile çalışan öneri sistemlerinin işleyişi ayrıntılı ve şeffaf bir şekilde açıklanmış ve bu açıklamanın ardından soruları yanıtlamaları istenmiştir. Elde edilen veriler, katılımcıların büyük çoğunluğunun bu sistemlere olumlu rıza gösterdiğini ortaya koymuştur. Şekil 11, 12, 13 ve 14'te gösterilen bulgular, katılımcıların kamera ile izlenerek hareketlerinin veri haline dönüştürülmesine yönelik rıza yaklaşımlarını ayrıntılı olarak sunmaktadır.

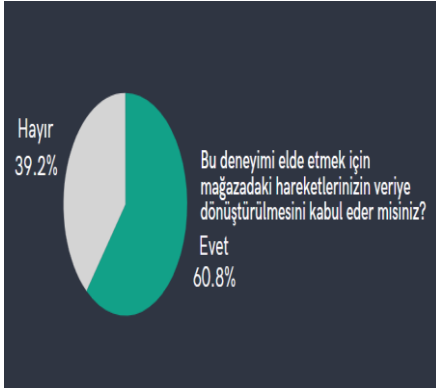


Şekil 11: Yapılan anketin 1. sorusunun grafik gösterimi

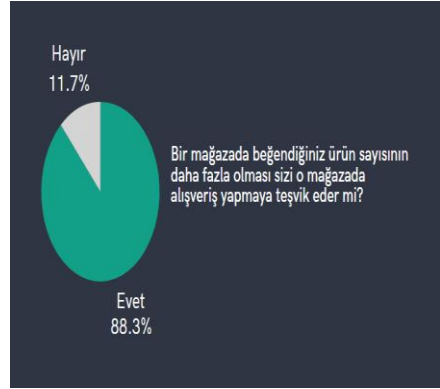


Şekil 12: Yapılan anketin 2. sorusunun grafik gösterimi

Müşterilerin alışveriş alışkanlıklarına göre kişiselleştirilmiş bir alışveriş deneyimine yaklaşımlarına ilişkin bulgular Şekil 11'de sunulmuştur. Ayrıca, müşteri profillerinin tercih ettiği ürünlerin analizi sonucunda, ürün yerleşiminde yapılan optimizasyonların etkinliğini değerlendirmek amacıyla sorulan "İlgi duyduğunuz ürünlerin mağazada daha görünür yerlere taşınması, bu ürünleri satın almanızı kolaylaştırır mı?" sorusuna verilen yanıtlar, Şekil 12'de detaylı olarak gösterilmiştir.



Şekil 13: Yapılan anketin 3. sorusunun grafik gösterimi



Şekil 14: Yapılan anketin 4. sorusunun grafik gösterimi

Müşterilere daha iyi bir alışveriş deneyimi sunmak amacıyla, görüntü tanıma teknolojisi kullanılarak mağaza içindeki hareketlerinin veriye dönüştürülmesine yönelik algılar, anket çalışmasıyla değerlendirilmiştir. Bu teknolojinin potansiyel faydaları ve etik boyutları hakkında bilgilendirilen katılımcıların, bu tür bir sistemin kullanılması konusundaki görüşleri Şekil 13'te ayrıntılı olarak sunulmuştur. Bulgular, müşteri hareketlerinin izlenmesi ve analiz edilmesi yoluyla elde edilen verilerin, alışveriş deneyimini optimize etmede ne derece kabul edilebilir bulunduğunu göstermektedir.

Ek olarak, müşteri kitlesinin tercih ettiği ürünler ve tarzlarına ilişkin verilerin analiz edilmesi sonucunda, bu ürünlerin türevlerinin mağazada artırılmasının, müşterilerin alışveriş yapma eğilimlerini nasıl etkilediği üzerine yapılan değerlendirme de önemlidir. Bu bağlamda, "Müşteri tarzı ve tercih ettiği ürünlerin verisine dayanarak, bu ürünlerin çeşitliliğinin artırılması sizi mağazada alışveriş yapmaya teşvik eder mi?" sorusuna verilen yanıtlar, Şekil 14'te detaylı bir şekilde sunulmuştur. Bu sonuçlar, veri temelli ürün çeşitliliği stratejilerinin müşteri davranışları üzerindeki etkisini analiz etmek için önemli bir gösterge niteliği taşımaktadır.

4. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışma, fiziksel mağazaların müşteri deneyimini iyileştirmek ve müşteri bağlılığını artırmak amacıyla derin öğrenme, yapay zekâ ve makine öğrenmesi teknolojilerini kullanarak öneri ve görüntü izleme sistemlerini entegre etme yöntemlerini incelemiştir. Çalışma kapsamında geliştirilen bağlam farkındalığına sahip öneri sistemleri, müşteri memnuniyetini artırmak için çevresel faktörleri, müşteri alışkanlıklarını ve ruh hallerini dikkate alarak kişiselleştirilmiş alışveriş deneyimleri sunmayı hedeflemektedir. Ayrıca, müşteri mahremiyetinin korunması amacıyla, derin öğrenme teknolojisi ile insan yüzlerinin bulanıklaştırılması gibi güvenlik önlemleri alınmıştır. Geliştirilen mobil uygulama arayüzü sayesinde, müşterilerin bu sistemlere rızasının sağlanması ve mağaza sahiplerinin mağaza hareketliliğini daha etkin bir şekilde izleyebilmesi mümkün hale getirebilir.

Çalışmanın bulguları, müşteri rızasına dayalı veri toplama ve analiz süreçlerinin etik açıdan kabul edilebilir olduğunu ve bu süreçlerin, mağaza optimizasyonları ve müşteri deneyimlerinin iyileştirilmesi açısından değerli bilgiler sunduğunu göstermektedir. Özellikle, hava durumu, yaklaşan etkinlikler ve bölgesel trendler gibi faktörlerin entegre edildiği öneri sistemlerinin, müşterilere daha isabetli öneriler sunarak satışları artırabileceği tespit edilmiştir.

Bu bağlamda, fiziksel mağazaların dijital dönüşüme uyum sağlayarak rekabet gücünü artırması için önerilen teknolojilerin entegrasyonu büyük önem taşımaktadır. Markaların, müşteri alışkanlıklarına dayalı verileri kullanarak ürün yerleşimlerini ve çeşitliliklerini optimize etmeleri, müşteri memnuniyetini artırmada etkili bir strateji olacaktır. Gelecekteki çalışmalar, bu sistemlerin daha geniş ölçekli uygulamalarını ve farklı perakende sektörlerindeki etkilerini inceleyerek, müşteri deneyimini daha da geliştirecek yenilikçi çözümler sunabilir.

KAYNAKLAR

- Alemdar, M. (2019). *Perakende sektöründe yapay zeka ve görüntü tanıma teknolojisi*. <https://medium.com/mertalemdar/perakende-sektorunde-yapay-zeka-ve-goruntu-tanima-teknolojisi-5ac7f2d06dc5>, (Erişim Tarihi: 18.06.2024).
- Arnold, M. J., & Reynolds, K. E. (2003). Hedonic shopping motivations. *Journal of Retailing*, 79(2), 77-95. [https://doi.org/10.1016/S0022-4359\(03\)00007-1](https://doi.org/10.1016/S0022-4359(03)00007-1).
- Barraza Carlos. (2024). makine öğreniminin avantaj ve dezavantajları. *Barraza Carlos*. <https://barrazacarlos.com/tr/makine-ile-ogrenmenin-avantajlari-ve-dezavantajlari/>, (Erişim Tarihi: 18.06.2024).
- Bologna, C., De Rosa, A. C., De Vivo, A., Gaeta, M., Sansonetti, G., & Viserta, V. (2013). Personality-based recommendation in e-commerce. DOI: [10.13140/2.1.1377.3763](https://doi.org/10.13140/2.1.1377.3763), <https://www.researchgate.net/publication/237286972>.
- Bozpolat, C. (2017). *Mağaza atmosferinin tüketici tercihindeki önemi: The importance of store atmosphere in consumer preference*. Year:1, Volume:1, Number:2, 1-2.
- Bulutistan. (2022). *Makine öğrenmesi nedir? Derin öğrenme ile arasındaki farklar*. <https://bulutistan.com/blog/machine-learning/>, (Erişim Tarihi: 18.06.2024).
- Bulutistan. (2023). *Veri madenciliği (data mining) nedir? Nasıl yapılır?* <https://bulutistan.com/blog/veri-madenciligi-data-mining-nedir-nasil-yapilir/>, (Erişim Tarihi: 05.07.2024).
- Burucuoğlu, M. (2011). *Müşteri memnuniyeti ve sadakatini arttırmada müşteri şikayetleri yönetiminin etkinliği: Bir örnek olay incelemesi*, Yüksek lisans tezi, Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü İşletme Anabilim Dalı, 1-118.
- Bükülmez, M. (2023). *Derin öğrenme nedir?* [Mustafabukulmez.com. https://mustafabukulmez.com/2023/07/26/derin-ogrenme-nedir/](https://mustafabukulmez.com/2023/07/26/derin-ogrenme-nedir/), (Erişim Tarihi: 05.07.2024).
- Casillo, M., Gupta, B.B., Lombardi, M., Lorusso, A., Santaniello, D., & Valentino, C. (2022). Context aware recommender systems: A novel approach based on matrix factorization and contextual bias. *Electronics*, 11(7), 1-19 <https://doi.org/10.3390/electronics11071003>.
- Cutolo, A., D'Aniello, G., Orciuoli, F., Pettinati, F., Sansonetti, G., & Vitagliano, C. (2013). *An ontology-based recommender system in e-commerce*.
- Devdiscourse. (2024). *AI-powered mask detection: Innovative solutions for enforcing mask mandates in public spaces*. <https://www.devdiscourse.com/article/health/3000933-ai-powered-mask->

detection-innovative-solutions-for-enforcing-mask-mandates-in-public-spaces, (Erişim Tarihi:18.06.2024).

- Doğan, Ö. (2024). *Müşteri memnuniyeti: Stratejiler, araçlar ve daha fazlası*. <https://ikas-landing-dev.vercel.app/tr/blog/musteri-memnuniyeti>, (Erişim Tarihi:20.06.2024).
- Elaraby, A., Elansary, I., & Nechaevskiy, A. (2021). Deep learning application for image enhancement. In *Proceedings of the 9th International Conference "Distributed Computing and Grid Technologies in Science and Education"*. DOI: 10.54546/MLIT.2021.21.97.002.
- Elele. (2022). *RGB renk kodları nedir? RGB renk kodlaması ile kaç farklı renk oluşturulur?* Elele. <https://www.elele.com.tr/plus/rgb-renk-kodlari-nedir-rgb-renk-kodlamasi-ile-kac-farkli-renk-olusturulur> (Erişim Tarihi:10.07.2024).
- Erdeniz, S. P., Menyctas, A., Maglogiannis, I., Felfernig, A., & Tran, T. N. (2020). Recommender systems for IoT enabled quantified-self applications. *Evolving Systems*, 11(2), 291–304. <https://doi.org/10.1007/s12530-019-09302-8>.
- Eroğlu, E. (2005). Müşteri memnuniyeti ölçüm modeli. *İ.Ü. İşletme Fakültesi İşletme Dergisi*, 34(1), 7-25.
- Evatro. (2024). *Görüntü tanıma ile mağaza denetimlerini kolaylaştırma*. Evatro. <https://www.Evatro.com/goruntu-tanima-ile-magaza-denetimlerini-kolaylastirma/>, (Erişim Tarihi:10.06.2024).
- Ghazanfar, M. A., & Prügel-Bennett, A. (2014). *Leveraging clustering approaches to solve the gray-sheep users problem in recommender systems*. *Expert Systems with Applications*, 41(7), 3506–3516. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2014.01.014>.
- Hadad, Y. (2017). *30 amazing applications of deep learning*. YaronHadad.com. <https://www.yaronhadad.com/deep-learning-most-amazing-applications/>, (Erişim Tarihi:12.07.2024).
- Joerding, T. (1999). A temporary user modeling approach for adaptive shopping on the web. In *Proceedings of the 2nd Workshop on Adaptive Systems and User Modeling on the WWW*. Dresden University of Technology, Multimedia Technology Group. Retrieved from <http://www.inf.tu-dresden.de/~tj4/>.
- Kamaşoğlu, Ç. T. (2020). *Veri madenciliği nedir?* IENSTITU. <https://www.iienstitu.com/blog/veri-madenciligi-nedir>, (Erişim Tarihi:05.07.2024).

- Kanan, C., Flores, A., & Cottrell, G. W. (2010). *Color constancy algorithms for object and face recognition*. University of California San Diego, Department of Computer Science and Engineering.
- Karakaşoğlu, M., & Arslan, F. M. (2016). Mağaza hizmet ortamının marka imajuna ve satın alma niyetine etkisi: P&B ve H&M örneği. *Marmara Üniversitesi Öneri Dergisi*, 12(46), 223-243. <https://doi.org/10.14783/od.v12i46.1000010012>.
- Karan, G. (2014). *Gizli müşteri nedir?* <https://medium.com/gizli-musteri/gizli-musteri-nedir-df86ddcb6e4d>, (Erişim Tarihi: 20.06.2024).
- Kayaalp, K., & Süzen, A. A. (2018). *Derin öğrenme ve Türkiye'deki uygulamaları* (s. 11). Institution of Economic Development and Social Researches Publications: IKSAD Publishing House. ISBN 978-605-7510-53-2.
- Kejriwal, K. (2023). *Görüntü tanıma vs. bilgisayarla görüş: Farklar nelerdir?* <https://www.unite.ai/tr/g%C3%B6r%C3%BCnt%C3%BCtan%C4%B1ma-vs-bilgisayar-g%C3%B6r%C3%BCn%C5%9F%C3%BC> (Erişim Tarihi: 17.06.2024).
- Kişisel Verilerin Korunması Kanunu. (2016). *Resmi gazete*. <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2016/04/20160407-8.pdf>, (Erişim Tarihi: 20.07.2024).
- Ko, H., Lee, S., Park, Y., & Choi, A. (2022). A survey of recommendation systems: Recommendation models, techniques, and application fields. *Electronics*, 11(1), 141. <https://doi.org/10.3390/electronics11010141>.
- Kumar, R., Verma, B. K., & Rastogi, S. S. (2014). Social popularity based SVD++ recommender system. *International Journal of Computer Applications*, 87(14), 33. <https://doi.org/10.5120/15148-5964>.
- Lops, P., de Gemmis, M., & Semeraro, G. (2011). Content-based recommender systems: State of the art and trends. https://doi.org/10.1007/978-0-387-85820-3_3.
- Mahadevkar, S. V., Khemani, B., Patil, S., Kotecha, K., Vora, D. R., Abraham, A., & Gabralla, L. A. (2022). A review on machine learning styles in computer vision—techniques and future directions. *Symbiosis Institute of Technology, Symbiosis International (Deemed University)*, 107293-107329.
- Tr.Books-Kingdom. (2024). Mobil bilişimde bağlam farkındalığı nedir? <https://tr.books-kingdom.com/8879903-what-is-context-awareness-in-mobile-computing>, (Erişim Tarihi: 30.06.2024).

- Mysoft. (2024). *Veri madenciliği nedir? Amacı ve kullanım alanları nedir?* Mysoft. <https://www.mysoft.com.tr/veri-madenciligi-nedir>, (Erişim Tarihi:05.07.2024).
- Ozkan, E. B. (2022). *Yapay zeka, makine öğrenmesi ve derin öğrenme nedir?* <https://medium.com/@elifbeyzaozkan/yapay-zeka-makine-%C3%B6%C4%9Frenmesi-ve-derin-%C3%B6%C4%9Frenme-nedir-c9cb1d7d171>, (Erişim Tarihi:30.06.2024).
- Örcün, H., Öztürkler, İ., & Darendelioğlu, M. S. (2019). *Kullanıcı tabanlı öneri sistemi*. Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Bitirme Projesi, 1-39.
- Özdarendeli, E. A. (2023). *Kişisel veri nedir? KVKK nedir?* <https://hakkimvar.medium.com/ki-CC%87%C5%9Fi-CC%87sel-veri-CC%87-nedi-CC%87r-kvkk-nedi-CC%87r-0e0e42784202>, (Erişim Tarihi:20.07.2024).
- Pazarlamasyon. (2018). *Amazon'dan ilk kasasız market*. <https://www.pazarlamasyon.com/amazondan-ilk-kasasiz-market/>, (Erişim Tarihi:20.06.2024).
- Ricci, F., Rokach, L., & Shapira, B. (2011). Introduction to recommender systems. *Recommender systems handbook* (pp. 1-35). Springer Science Business Media. https://doi.org/10.1007/978-0-387-85820-3_1.
- Sonsuz Bilgi. (2024). *Yapay zeka ve görüntü işleme: Görüntü tanıma teknolojileri nasıl çalışıyor?* Sonsuz Bilgi. <https://sonsuzbilgi.com.tr/premiumdetay-587526-Yapay-Zeka-ve-Goruntu-Isleme-Goruntu-Tanima-Teknolojileri-Nasil-Calisiyor.html> (Erişim Tarihi:15.06.2024).
- Şimşek, B. (2023). *Müşteri sadakat programı nedir?* <https://medium.com/flo-teknoji/m%C3%BC%C5%9Fteri-sadakat-program%C4%B1-nedir-47c9298c0eb2>, (Erişim Tarihi:20.06.2024).
- Şimşek, N. Y. (2019). *Derin öğrenme (deep learning) nedir ve nasıl çalışır?* <https://nyilmazsimsek.medium.com/derin-%C3%B6%C4%9Frenme-deep-learning-nedir-ve-nas%C4%B1-%C3%A7al%C4%B1%C5%9F%C4%B1r-2d7f5850782> (Erişim Tarihi:05.07.2024).
- Todt, J., Hanisch, S., & Strufe, T. (2022). *Fantômas: Evaluating reversibility of face anonymizations using a general deep learning attacker*. Technical University Dresden, 1-19, <https://arxiv.org/abs/2210.10651>.
- Wang, D., Liang, Y., Xu, D., Feng, X., & Guan, R. (2018). A content-based recommender system for computer science publications. *Knowledge-Based Systems*, 157, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2018.09.032>.

- Woods, D. (2022). *Google Lens app: What it does and how to use it*. Techcultan. <https://techcultan.pages.dev/posts/google-lens-app-what-it-does-and-how-to-use-it/#how-does-google-lens-work>, (Erişim Tarihi: 12.06.2024).
- Yapay Zekâ ve Teknoloji Derneği. (2021). *Yapay zeka maske kontrolü yapacak*. <https://yztd.org.tr/blog/yapay-zeka-maske-kontrolu-yapacak>, (Erişim Tarihi: 17.06.2024).
- Yücel, A., & Yücel, N. (2012). Mağaza imajı ile mağaza sadakati arasındaki ilişkinin belirlenmesi: Denizli ilinde yapılan bir araştırma. *Yönetim Bilimleri Dergisi*, 10(19), 1-30.

3. Bölüm

Nesnelerin İnterneti ve Güvenliği

Çiğdem BAKIR¹

¹ Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Yazılım Mühendisliği Bölümüm
43000, Kütahya, Türkiye, cigdem.bakir@dpu.edu.tr

Özet

Nesnelerin interneti (Internet of Things - IoT), günlük hayatımızda kullandığımız nesnelerin internet sayesinde birbirleriyle veya büyük sistemlerle bağlantılı olmasına ve veri alışverişi yapmasına dayanan bir iletişim ağıdır. Diğer cihazlarla iletişim kurulması veri iletişimi için çeşitli sensörler, yazılımlar ve diğer teknolojilere gömülüdür. Günümüzde evlerde birçok nesne internet bağlantısı ile çalışmaktadır. Bu nedenle nesnelerin interneti en önemli teknolojilerden biri haline gelmektedir. Kullanımın bu kadar artması ile beraber getirdiği kolaylık ve verimlilikle birlikte güvenlik konusunda da endişeler oluşturmaktadır. Bu çalışmada, literatürde bulunan nesnelerin interneti ve güvenliği ile ilgili yapılmış olan çalışmaların incelenmesi amaçlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: IoT, güvenlik, sensör, cihaz, mobil

Giriş

Nesnelerin interneti, nesnelerin internet sayesinde birbirleriyle iletişim kurarak veri alışverişi yapabildikleri bir teknolojidir [1]. Bu teknoloji akıllı cihazlar aracılığıyla toplanan verileri ağ geçitleri ve bulut sistemler üzerinden paylaşmaktadırlar. Nesnelerin interneti, evlerde, sağlık sektöründe, kurumsal alanlarda ve çeşitli sektörlerde sıklıkla kullanılmakta ve iş ve kişisel hayatı kolaylaştırmaktadır. Nesnelerin interneti sayesinde günümüzde birçok iş otomatik olarak yapılabilmekte ve bu durum karmaşık süreçleri otomatize ederek iş yükünü azaltabilmektedir. Bu teknoloji hayatı kolaylaştıran faydalar sunmasının yanında önemli güvenlik sorunlarını da akla getirmektedir. Bu teknolojinin yaygınlaşması ile beraber, siber saldırılar ve veri ihlalleri olma riski artmaktadır.

Nesnelerin internetinden iki anlamda bahsedilir [2]. Bunlardan ilki, merkez konumda olan internettir. Çünkü internet kendi içerisinde sürekli gelişen ve bununla beraber genişleyen bir ağ sistemidir. İkincisi ise nesnelerin interneti kullanıcılarıdır. Bu kullanıcılar bilgi alışverişinde bulunurlar ve iletişim kurarlar. Bütün IoT iş sisteminin işlevsel çekirdeği IoT sunucusudur. Bu sunucu tarafından sensör verilerinin toplanması, işlenmesi ve işleme sonuçlarının değerlendirilmesi gerçekleştirilir. Nesnelerin interneti genelleşirken bununla birlikte büyük güvenlik sorunları da ortaya çıkmaktadır. Bu güvenlik sorunlarının sebepleri; terminal sayısının hızla artması, IoT sunucularının büyük miktarlarda kullanıcı verisi depolaması, IoT iş uygulamasının arayüzünün halka açık olmasıdır. Tüm bu sebepler sistemin alt yapısı ve bileşenlerini savunmasız kılar. Nesnelerin internetinin güvenlik unsurlarının sağlanması için gerekli işlevlerinin korunmasını en üst düzeye çıkarmak dolayısıyla saldırı yüzeyini en aza indirmektir. Saldırı yüzeyi olarak betimlenen kavram, yetkisiz kullanıcılarının veri girebileceği veya çıkarabileceği ağ çalışma ortamındaki saldırıya açık konumdur.

Mobil ağların 1G ağından 5G ağına gelişme sürecinde Nesnelerin İnterneti (IoT) bu ekosistemde büyük bir rol oynamıştır. İnsanın hayatını kolaylaştırmak, kontrol etmek ve düzenlemek amacıyla kullanılan mobil cihazlar sistemlerinde mevcut olan işlevleri yerine getirmek için nesnelerin interneti kullanırlar [3]. Nesnelerin İnterneti (IoT) anlam olarak akıllı nesnelerin veya diğer şeylerin birbirine bağlanmasıdır. Bu bağlanmada insan mevcut ise İnsanların İnterneti (IoP), herhangi bir hizmet mevcut ise Hizmet İnterneti (IoS) olur. Bu anlamdan da çıkarılabileceği üzere Nesnelerin İnterneti (IoT) cihazlar, makineler, nesnelere ve insanlardan oluşan geniş bir ağıdır. Bu ağı kurmanın amacı gerekli olan bilgileri toplamak, bu bilgiler üzerinde analizler yapmak ve yapılan analizler sonucu tanımlanan görevi yerine getirmektir. Bunun haricinde bu işlemleri yerine getiren fakat kendi sistemi içerisinde ağ kuran özel sistemlerde

vardır. İşlevlerinden biri olan bilgi toplama ve bu bilgileri paylaşma yeteneğini sağlaması için sistemlere fiziksel şekilde çeşitli gömülü sensörler ve aktüatör ağları tanımlanır.

Nesnelerin İnterneti (IoT) tarihine bakacak olursak ilk örneğine kok kömürünün soğukluğunu ölçmek için internete bağlı bir kok makinesi inşa edilmesi olarak rastlanmıştır [4]. İlerleyen tarihlerde ise bu ağ sistemi ev aletleri konusuna geçmiştir. Bu ağ sisteminin geçişi cihazların birbirleri arasındaki iletişimi olarak tanımlanmıştır. Daha sonra Nesnelerin İnterneti (IoT) terimini Radyo Frekanslı Tanımlama (RFID) teknolojileri icat edilmiştir. Kullanımın yaygınlaşması ile bu sisteme bağlı cihazların sayısı insan sayısını geçmiştir. Bu doğrultuda tanımlama konusu için IPV6 piyasa sürülmüştür. Günümüze baktığımızda ise dünyaca ünlü şirketlerin Nesnelerin İnterneti (IoT) kullandıkları ve yazılımlarına işledikleri görülmüştür.

Nesnelerin İnterneti (IoT) 'in nesne/algı, ara yazılım ve uygulama katmanı olmak üzere üç temel katmanı bulunmaktadır [5]. Ayrıca bu katmanlar algılama, bilgi işlem, iletişim ve çalıştırma temellerine dayanır. Günümüzde ve gelecekte neredeyse her şeyin internet ile bağlantısının olması ve bulut sistemi, yapay zekâ, büyük veri analitiği ve makine öğrenimi konuları için Nesnelerin İnterneti (IoT) faydalanılması planlanmaktadır. Bu faydalanma insanın olduğu her alanda (Eğitim, sağlık, endüstri, ulaştırma, askeriye vb.) aktif olarak rol oynamaktadır. İnsanların Nesnelerin İnterneti (IoT) teknolojilerini kullandıkları alanlar; akıllı şebekeler, akıllı tıbbi cihazlar, akıllı şehirler, giyilebilir cihazlar, termostatlar gibi bağlı cihazlar ve bağlı akıllı evler gibi birçok şekilde karşımıza çıkmaktadır. Günümüzde Nesnelerin İnterneti (IoT); imalat, enerji, ulaştırma, lojistik ve sağlık için gerekli alanlarda kullanılmaktadır.

Nesnelerin İnterneti (IoT) 'nin işlevini yerine getirebilmesi için gerekli parametreler vardır [6]. Bu parametreler bulut bilişim, kablosuz sensör ağları, gömülü sistemler, iletişim protokolleri, büyük veri analizi, mobil internet, arama motorları, güvenlik protokolleri ve web hizmetleridir. Nesnelerin İnterneti (IoT) kullanılan sensörler ve aktüatörlerin çalışma mantıkları çok önemlidir. Sensörler bir enerji biçimini diğer bir enerji biçimine dönüştüren fiziksel cihazlar olarak tanımlanan dönüştürücülere denir. Aktüatörler ise sensörün çalışma mantığının tersi olarak tanımlanır. Bu mantıkta mevcut olan elektrik girdilerini alıp fiziksel eylemlere dönüştürürler.

Nesnelerin İnterneti (IoT) için önemli kavramlardan biri de kablosuz uygulama protokolü (WAP)dür [7]. Bu protokole göre her yerden kablosuz bir şekilde internet erişimi olması mümkündür. Nesnelerin İnterneti (IoT) M2M iletişim ve ağ protokollerine bakıldığında manuel işlem kullanılmadan cihazların bilgi alışverişlerinde bulunarak eylemler gerçekleştirilmesini sağlayan

teknolojidir. Nesnelerin İnterneti (IoT) 'nde kullanılan ve büyük kolaylık sağlayan bulut bilişim sistemi bilgi teknolojisi tarafından bulunan ve depolanan verilerin analitiğini yapmaya imkân sağlayan sistemdir. Bu sistem sanallaştırılmış kaynaklar, paralel işleme, güvenlik ve veri depolama gibi parametreler için avantajlıdır.

Günümüzde IoT parametrelerin birçoğunu içeren akıllı telefonlar ve mobil bilgi işlem sistemleri büyük bir önem arz etmektedir [8]. Akıllı telefonlar ve mobil bilgi işlem insanlara internette gezinmek, yazılım programları çalıştırmak, etkileşim için dokunmatik ekran kullanmak ve kablosuz internet teknolojisinden faydalanmayı sağlamaktadır. IoT' nin güvenliğinin sürekli ve sürekli olarak kontrol edilebilir durumda olması gerekir. Bunun için güvenlik avcıları mevcut ağır güvenliğinin ihlal edildiğini varsayar veya bu olasılığın ihtimalini düşünerek sürekli olarak izinsiz girişleri bulmak için mevcut ağı analiz ederler. İzinsiz giriş sağlayan bu kullanıcılara davetsiz misafir denir. Davetsiz misafiri işgal etmek için mevcut olan zincire davetsiz misafiri öldürme zinciri denir. Bu zincirin süreçleri; keşif, silahlanma, dağıtım, sömürü, yerleştirme, komuta ve kontrol, hedef eylemleridir.

İlgili Çalışmalar

Ataç ve Akleylek çalışmalarında IoT güvenlik sorunlarını ele almışlar ve karşılaştırmışlardır [9]. Tedbir ve önlemler konusunda da önerilerde bulunmuşlardır. Önceki çalışmaların ışığında, IoT' nin zayıf noktaları ve çözümleri şu şekilde gruplandırılabilir: yetersiz kimlik doğrulama/otorizasyon mekanizmaları, uygun şifreleme tekniklerinin kullanılmaması, siber saldırılar, gizlilik, yazılım/firmware ile ilgili sorunlar ve insan faktörü. Bu tehditlere karşı alınabilecek bazı karşı önlemler arasında varsayılan şifrelerin değiştirilmesi, güçlü parolaların kullanılması, iki faktörlü kimlik doğrulama, veri şifreleme ve güvenlik duvarı kullanımı bulunmaktadır. IoT' nin temel bileşenleri saldırganlar tarafından kullanılarak bilgi güvenliğinin ana unsurlarının hedef alınabileceğini ve kişisel, kurumsal veya ulusal düzeyde ciddi tehditler oluşturabileceğini göstermektedir. IoT güvenliğini artırmak için çeşitli karşı önlemler bulunmaktadır. Sistemlerin tasarım aşamasından itibaren güvenlik politikaları ve standartlara göre yapılandırılması gerekmektedir. IoT uç nokta cihazları genellikle güvenlik sistemlerindeki en zayıf halka olabilir, bu nedenle bu cihazların güvenliğini sağlamak için internet trafiğinin kısıtlanması yerine tüm anormalliklerin izlenmesi ve bu durumda uyarı ve engelleme mekanizmalarının devreye sokulması gerekmektedir. Verimli işleyen asimetrik şifreleme çözümleri gibi problemlerin karmaşıklık ve ölçeklenebilirlik sorunları çözülebilir. Gizlilik konusunda, IoT verileri toplanıp analiz edilebilir ve potansiyel tehditler

tanımlanıp çözülebilir. Yeni nesil kablosuz ağ teknolojileri ve protokol tasarımı üzerinde etkili çalışmalar, güvenliği artırabilir.

Avcı çalışmasında akıllı evlerde IoT kullanımında güvenlik sorunlarını ve alınabilecek önlemleri ele almışlardır [10]. Akıllı evler, IoT teknolojisinin önemli bir uygulama alanıdır ve kullanıcılara yaşamı kolaylaştıran çeşitli avantajlar sunmaktadır. IoT, algılayıcılar, ağ ve haberleşme, sunucu ve depolama, ve uygulama katmanları olmak üzere dört katmandan oluşmaktadır. Akıllı evler, duman sensörleri, kapı giriş kontrolü, güvenlik sensörleri, enerji ölçümü gibi çeşitli özelliklerle donatılmıştır ve kullanıcının ihtiyaçlarına göre özelleştirilebilmektedir. Akıllı evlerde IoT güvenliği önemli bir konudur çünkü artan cihaz sayısı ile birlikte güvenlik açıkları ve siber saldırılar da artmaktadır. Özellikle dijital asistanlar gibi cihazlar evlere erişimi kolaylaştırmaktadır, ancak bu durum siber saldırılara ve veri hırsızlığına neden olabilmektedir. Bu güvenlik risklerine karşı önlem almak önemlidir. Güvenlik açıkları, veri hırsızlığı ve kimlik avı gibi tehditlerle başa çıkmak için kimlik doğrulama, şifreleme ve erişim kontrolü gibi önlemler alınmalıdır. Ayrıca, IoT cihazlarının varsayılan ayarlarının değiştirilmesi ve güncel tutulması da önemlidir. Kullanıcıların bilinçlenmesi ve bilişim okuryazarlığının artırılması da bu konuda önemli bir faktördür. Güvenlik sorunlarının çözümü için bütüncül bir yaklaşım benimsenmelidir ve güncel güvenlik önlemleri sürekli olarak takip edilmelidir. Akıllı ev sistemleri kullanan kullanıcılar temel güvenlik önlemlerini almalı, kişisel verilerini güvenli bir şekilde saklamalı ve güncellemeleri düzenli olarak yapmalıdır. Ayrıca, güvenilir satıcıları tercih etmeli ve güvenlik konusunda uzman kişilerden destek almalıdırlar.

Yıldırım, Demiroğlu ve Şenol çalışmalarında IoT, IoT' nin temel bileşenleri, katman yapısı ve güvenlik saldırılarını incelemişlerdir [11]. IoT' nin temel bileşenleri arasında akıllı cihazlar ve iletişim protokolleri bulunmaktadır. Akıllı cihazlar, çevreden veri toplar, iletişim kurar ve internet üzerinden etkileşim sağlamaktadırlar. Bu cihazlar, iletişim birimi, işlemci ve sensörlerden oluşmaktadır. İletişim protokolleri, IoT sistemindeki akıllı cihazların ağ üzerinde iletişim kurmasını sağlar. Önemli iletişim protokolleri arasında CoAP, MQTT, AMQP, XMPP, DDS ve HTTP REST bulunmaktadır. Bulut bilişim, IoT'nin temel bileşenlerinden biridir ve verilerin işlenmesi, depolanması ve analiz edilmesini sağlamaktadır. IoT' nin mimarisinde, 3, 4 veya 5 katmanlı yapılar önerilmektedir. Algılama, Ağ, ve Uygulama katmanlarından oluşan 3 katmanlı mimari, IoT teknolojisinin ilk önerilen yapılarından biridir. Gelişen IoT teknolojisiyle birlikte, 4 katmanlı mimari geliştirilmiş ve destek katmanı eklenmiştir. Güvenlik ve depolama sorunlarını çözmek için 5 katmanlı bir mimari önerilmiştir. Algılama katmanı, veri toplamak ve algılamakla görevlidir ve ana

tehditler arasında dinleme, sahte düğme, zamanlama, ve yeniden oynatma saldırıları bulunmaktadır. Ağ katmanı, algılama ve uygulama katmanları arasındaki iletişimi sağlar ve DoS, MiTM, depolama, ve saldırılarını hedef almaktadır. Uygulama katmanı, tüm uygulamaların işleyişinden sorumludur ve XSS, zararlı kod, ve veri yığınlarının işlenmesi gibi tehditlerle karşı karşıyadır. Destek katmanı, ağa ek bir güvenlik katmanı ekler ve DoS ve kötü amaçlı içeriden saldırıları önlemektedir. İşlem katmanı, büyük verileri işlerken IoT cihazlarının performansını artırmaya yöneliktir ve tükenme ve kötü amaçlı yazılım gibi saldırılara maruz kalmaktadır. Taşıma katmanı, işlem ve algılama katmanları arasında iletişimi sağlamaktadır. İş katmanı, sistem yönetimini ve kullanıcı gizliliğini sağlar ve iş mantığı ve sıfır gün saldırılarına maruz kalabilmektedir.

Tawalbeh ve arkadaşları çalışmalarında, IoT uygulamalarını, faydalarını ve potansiyel riskleri incelemişler ve güvenlik uygulamalarını geliştirmek için bir çerçeve sunmayı amaçlamışlardır [12]. IoT' nin getirdiği faydaların yanında, siber güvenlik ve gizlilik riskleri ana endişeler arasında yer almaktadır. Yüksek profilli siber saldırılar, IoT teknolojilerinin zayıflıklarını göstermektedir. IoT' nin çeşitli güvenlik zorlukları, özellikle cihazların benzersiz özellikleri nedeniyle daha karmaşık hale gelmektedir. Kullanıcıların güvenliğe dair farkındalığının eksikliği ve cihazların güvenliği, özellikle kişisel bilgilerin korunması açısından kritik hale gelmektedir. Bu nedenle, IoT'de güvenlik ve gizlilik açıklarını azaltmak için daha etkili çözümler geliştirilmesi gerekmektedir. Önerilen IoT katmanlı model, cihaz, bulut ve son kullanıcı katmanlarından oluşmaktadır. Bu model, kenar hesaplama yeteneği ile hızlı kararlar alabilir ve verileri buluta ileterek uzun vadeli depolama sağlar. Güvenlik ve gizlilik politikaları, her katmanın belirli güvenlik önlemleri almasını ve veri gizliliğini sağlamayı amaçlar. Önerilen model, AWS bulutunu ana bulut olarak kullanırken Raspberry Pi 4'ü kenar düğümü olarak kullanarak bir Edge-IoT sistemi uygular. Güvenlik politikaları, her cihazın yetkilendirilmiş ve güvenli bir şekilde iletişim kurmasını sağlayan sertifikalar ve anahtarlar kullanır. Bu yöntemle, IoT cihazlarının güvenliğini ve veri gizliliğini koruyarak bulut-tabanlı hizmetlerde güvenli bir ortam sağlanmaktadır.

Öztürk'ün çalışmasının amacı, Nesnelerin İnterneti (IoT) teknolojisinin etik sorunlarını incelemek ve bu sorunlara yönelik çözüm önerileri sunmaktır [13]. Etik, ahlaki değerlerle ilgili olup doğru ve yanlışın ne olduğunu değerlendiren bir disiplindir. IoT'nin gelişimiyle ortaya çıkan ahlaki ikilemler, veri gizliliği, güvenlik ve şeffaflık gibi konular üzerinde yoğunlaşmaktadır. Etik Sorunları Veri Sahipliği ve Gizlilik ve Güvenlik İhlalleri olarak incelemiştir. Çözüm Önerileri olarak Etik Standartların Geliştirilmesi, Kullanıcıların Bilinçlendirilmesi, Veri Anonimleştirme, Erişim Kontrol Modelleri önerilmiştir. Sonuç olarak IoT teknolojisinin etik sorunları, özellikle veri gizliliği ve güvenliği konularında

önemli riskler taşıdığı sonucuna varmıştır. Bu nedenle, etik çerçevelerin ve standartların geliştirilmesi, kullanıcıların bilinçlendirilmesi ve veri anonimleştirme gibi çözümlerle bu sorunların üstesinden gelinmesi amaçlanmaktadır. Ayrıca, kurumların da bu sorumluluğu üstlenmeleri ve kullanıcıların yanı sıra kendilerinin de etik ilkelere uymaları gerektiği vurgulanmaktadır .

Satılmış ve Akleylek çalışmalarında, IoT (Nesnelerin İnterneti) ağlarında saldırı tespiti üzerine yapılan çalışmaları incelemekte ve özetlemektedir [14]. Amaçları, IoT ağlarında saldırı tespiti için kullanılan makine öğrenimi ve derin öğrenme tekniklerini değerlendirmek ve bu tekniklerin performanslarını karşılaştırmaktır. Bu doğrultuda, farklı veri kümeleri üzerinde test edilen modellerin sonuçları incelenmiş ve modellerin etkinliği hakkında bilgi verilmiştir. Literatür incelemesi yapılarak IoT ağlarında saldırı tespiti üzerine gerçekleştirilen araştırmalar detaylı bir şekilde ele alınmış ve bu çalışmalarda kullanılan yaklaşımlar özetlenmiştir. İncelenen çalışmalarda kullanılan makine öğrenimi ve derin öğrenme modelleri, Doğru Pozitif Oranı (TPR), Yanlış Pozitif Oranı (FPR) ve Eğri Altındaki Alan (AUC) gibi performans metriklerine göre karşılaştırılmıştır. Ayrıca, çalışmalarda kullanılan veri kümeleri ve bu kümelerin özellikleri de detaylandırılmıştır. Sonuç olarak farklı modellerin performansları değerlendirilmiş ve belirli modellerin belirli saldırı türlerinde daha etkili olduğu tespit edilmiştir. İncelenen çalışmalarda karşılaşılan eksiklikler belirtilmiş ve bu eksikliklerin giderilmesi için öneriler sunulmuştur. Bu eksiklikler arasında, veri kümelerinin çeşitliliği ve boyutu, modellerin gerçek zamanlı performansı ve düşük güçlü IoT cihazlarında uygulanabilirliği gibi konular yer almaktadır [18].

Tulgar ve arkadaşları, çalışmalarında IoT (Nesnelerin İnterneti) ağlarındaki anormallik tabanlı saldırıları tespit etmek amacıyla makine öğrenimi ve derin öğrenme modellerinin kullanıldığı çalışmaları incelemişlerdir [15]. 2019-2021 yılları arasında yayımlanan ve Scopus, IEEE Xplore, WoS, ve ScienceDirect gibi veri tabanlarından elde edilen çalışmalar araştırılmıştır. Araştırma sürecinde belirli filtreleme kriterleri kullanılarak toplamda 133 çalışma değerlendirilmiş, bunlardan 15 tanesi detaylı incelemeye alınmıştır. İncelenen bu çalışmalarda önerilen yaklaşımlar, kullanılan makine öğrenimi ve derin öğrenme modelleri, performans metrikleri ve veri kümeleri değerlendirilmiştir. Sonuç olarak, IoT güvenliği için kullanılan makine öğrenimi ve derin öğrenme modellerinin etkili olduğu görülmüş, ancak bu modellerin kaynak kodlarının çoğunlukla paylaşılmadığı ve gerçek zamanlı saldırılara karşı tepkilerin ve kaynak tüketiminin yeterince analiz edilmediği vurgulanmıştır. Bu eksikliklere rağmen, makine öğrenimi ve derin öğrenme yöntemlerinin IoT ağlarındaki anormallikleri tespit etmede büyük bir potansiyele sahip olduğu sonucuna varılmıştır.

Kandır ve arkadaşlarının çalışmaları ev ağlarındaki Nesnelerin İnterneti (IoT) cihazlarının güvenlik durumlarını değerlendirme ve özellikle UPnP (Universal Plug and Play) protokolü üzerinden bu cihazların siber saldırılara karşı savunmasızlığını inceleme amacını taşımaktadır [16]. Çalışmada, ev ağı içinde bulunan yaygın kullanılan cihazların güvenlik seviyeleri detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Python programlama dili kullanılarak ev ağındaki UPnP zafiyetlerini tespit etmek üzere özel bir uygulama geliştirilmiş ve bu uygulama ile 15 cihazdan 3'ünün UPnP açıklığına sahip olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, UPnP açıklıklarının nasıl istismar edilebileceği konusunda bir saldırı senaryosu da oluşturulmuştur. Çalışma sonuçları, IoT cihazlarının güvenliğinin sağlanmasının önemini vurgulamakta; çoğu IoT cihazının özel güvenlik yazılımları için uygun olmadığı ve bu nedenle siber saldırılara karşı savunmasız olduğu belirtilmektedir. Özellikle, klasik cihazların ağa dahil edilmesiyle güvenlik açıklarının artabileceği ve bu açıkların güncellemelerle kapatılması gerektiği üzerinde durulmaktadır. Ev ağındaki cihazların kontrolü için piyasada bulunan uygulamaların zararlı yazılımlar içerebileceği ve bu nedenle güvenilir, açık kaynak kodlu uygulamaların tercih edilmesi gerektiği vurgulanmaktadır. Bu çalışma, IoT cihazlarının ev ağlarında güvenli bir şekilde yönetilmesi için alınması gereken önlemleri ve dikkat edilmesi gereken noktaları detaylandırmaktadır.

Gökdemir ve Çalhan çalışmalarında, Nesnelerin İnterneti (IoT) ortamlarında derin öğrenme ve makine öğrenmesi temelli anomali tespiti üzerinde odaklanmaktadır [17]. Temel amaç, IoT sistemlerine yönelik siber saldırıları tespit etmek için kullanılan derin öğrenme ve makine öğrenmesi algoritmalarını karşılaştırmaktır. Çalışmada, klasik makine öğrenmesi algoritmaları olan Destek Vektör Makineleri (SVM) ve Naive Bayes (NB) ile derin öğrenme algoritması olan Uzun Kısa Vadeli Bellek (LSTM) karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırmada, LSTM algoritmasının, doğruluk ve f1 skoru gibi performans metrikleri açısından daha yüksek başarı elde ettiği ve IoT güvenliği için etkili bir çözüm olarak öne çıktığı belirtilmiştir [22]. Ancak, makale aynı zamanda LSTM'in çalışma süresi açısından bazı dezavantajlar taşıdığını da vurgulamaktadır. Bu, LSTM'in gerçek zamanlı uygulamalarda veya kaynak kısıtlı IoT cihazlarında kullanımının zorluklarına işaret etmektedir. Dolayısıyla, IoT ortamlarında derin öğrenme tekniklerinin uygulanabilirliği ve performansı üzerine yapılan bu çalışma, hem avantajlarını hem de dikkate alınması gereken pratik zorlukları detaylandırmaktadır. Bu bağlamda, LSTM'in IoT güvenliğindeki rolüne dair kapsamlı bir değerlendirme sunmaktadırlar.

Taş ve Kiani çalışmalarında, IoT cihazlarının güvenliği üzerine odaklanmakta ve saldırıları tespit etmek ile önlemek amacıyla çeşitli yöntemler ve bulgular sunmaktadır [18]. IoT cihazlarının güvenliğine yönelik saldırıları tespit etmek ve

önlemek makalelerinin temel amacıdır. Saldırıları ağ katmanlarına göre sınıflandırma yaparak ve buna göre savunma teknikleri önererek bu amaç doğrultusunda adımlar atılmıştır. IoT sistemlerinin farklı ağ yapıları ve teknolojilerin birleşimi nedeniyle birçok saldırıya açık olduğu vurgulanmıştır. Sonuçlar olarak, IoT cihazlarında gerekli güvenlik önlemleri alınmadığında ortaya çıkabilecek veri kaybı ve yetkisiz erişimler gibi risklerin altı çizilmiştir. Makale, katman bazlı çözümler önererek IoT güvenliği konusunda detaylı bir çalışma sunmaktadır.

Calp ve Bütüner, çalışmalarında IoT tabanlı sistemlerde siber saldırı tespiti için makine öğrenimi algoritmalarının kullanılması üzerine odaklanmaktadır [19]. IoT sistemlerinden elde edilen verileri kullanarak siber saldırıları tespit etmek ve önlemeyi amaçlamışlardır. Bu amaç doğrultusunda bir veri seti oluşturulmuş, ön işleme adımları uygulanmış ve veri seti eğitim ve test için bölünmüştür. KNN (K-Nearest Neighbors), RF (Random Forest), ANN (Artificial Neural Network), NB (Naive Bayes) ve LR (Logistic Regression) gibi çeşitli makine öğrenimi algoritmaları kullanılarak modeller geliştirilmiştir. RF algoritmasının %99.6 oranında siber saldırı tespit başarısı elde ettiği belirtilmiştir. Diğer algoritmalarla karşılaştırıldığında RF modelinin öne çıktığı ve çok başarılı sonuçlar sunduğu vurgulanmıştır. Sonuç olarak ise, yapay zeka algoritmalarının IoT cihazları içeren ortamlarda siber saldırıların tespit edilmesi ve önlenmesi için etkili bir yöntem olduğu sonucuna varılmıştır.

Gönen ve arkadaşları çalışmalarında Nesnelerin İnterneti (IoT) ortamında Hello Flood saldırılarını önlemek için bir makine öğrenmesi yaklaşımı sunmaktadır [20]. Bu tür saldırıları tespit etmek ve etkili bir şekilde önlemeyi amaçlamışlardır. K-means algoritması kullanılarak saldırının tespitine odaklanılmış ve saldırıyı gerçekleştiren cihaz başarıyla tanımlanmıştır. Sonuç olarak makalede önerilen yöntemin benzer saldırıların hızlı bir şekilde tespit edilmesini sağladığı ve sistemin saldırıdan minimum hasarla kurtulabileceği gösterilmiştir. Bu çalışma, IoT güvenliğini artırmak adına önemli bir adım olarak değerlendirilmekte olup, IoT ortamlarında karşılaşılan saldırıları ve zafiyetleri tespit etme konusunda önemli katkılar sağlayabileceği vurgulanmaktadır.

Ülker ve arkadaşları, Nesnelerin İnterneti'ni (IoT) kişisel, kurumsal ve ulusal bilgi güvenliği açısından detaylı bir şekilde incelemeyi amaçlamaktadır [21]. Ana hedeflerini IoT sistemlerine yönelik potansiyel saldırıları araştırmak ve bu sistemler için güvenlik önlemleri önermek olarak belirtmişlerdir. IoT'nin bileşenleri ve güvenlik mimarisi detaylı bir şekilde incelenmiş, bu sistemlere yönelik olası tehditler üzerinde durulmuş ve bu tehditlere karşı alınabilecek önlemler tartışılmıştır. Sonuç olarak, IoT'nin kişisel, kurumsal ve ulusal bilgi güvenliği açısından kritik öneme sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Özellikle,

veri toplama süreçlerinin ve güvenlik sistemlerinin güvenilirliğinin artırılması gerektiği belirtilmiş ve IoT sistemlerinde ortaya çıkabilecek yeni güvenlik açıklarının hızla ele alınması gerektiği vurgulanmıştır.

Amarouche ve Küçük, Nesnelerin İnterneti (IoT) sistemlerinde saldırı tespiti üzerine odaklanan bir çalışma sunmuşlardır [22]. Çalışmanın amacı, IoT ortamlarında meydana gelebilecek saldırıları belirlemek ve bu saldırıları tespit etmek için yapay zeka (AI) teknolojilerini kullanarak güvenlik analizleri yapmaktır. Yöntem olarak, çeşitli makine öğrenimi (ML) ve derin öğrenme (DL) modelleri incelenmiş ve bu modeller arasında performans karşılaştırmaları yapılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda, bazı ML ve DL modellerinin IoT sistemlerindeki saldırıları yüksek doğruluk oranlarıyla tespit ettiği gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, makale, IoT güvenliği için yapay zeka tabanlı modellerin kullanımının potansiyelini vurgulamakta ve bu alanda ileriye yönelik araştırmaların önemini ortaya koymaktadırlar.

Nesnelerin İnternetinde Güvenlik

İnternet ortamında her geçen gün yeni bir veri üretiliyor ve bununla birlikte bu verilerin güvenliklerini koruma talepleri artıyor. Ağ güvenliği bilgi endüstrisinin yapıtaşını oluşturmaktadır. Nesnelerin interneti günümüzde yeni bir ekosistem ortaya çıkarması, gömülü sistem ağına sahip olması ve kablosuz yöntemlerle veri alışverişi yapması dolayısıyla güncel bir hizmet sunmaktadır fakat bu güncel hizmetin yanı sıra eş zamanlı olarak sahip olduğu birçok güvenlik problemini de beraberinde getirmektedir. Nesnelerin interneti mevcut olan ağ sistemlerden farklı bir şekilde gömülü sistemler üzerinde işleyişi vardır. Bu işleyiştten dolayı iletişim protokolü sisteme, cihaza ve uygulamaya bağlı olarak değişkenlik gösterir. Tüm bu değişkenlikler büyük bir güvenlik riskini de beraberinde getirir.

Standart bir ağ sisteminde saldırılarının ana unsurları; kötü amaçlı kodlar, truva atları, bilgisayar korsanları, virüsler, kötü amaçlı nesnelere [23]. Nesnelerin interneti ağının ele geçirilmesinde cihaz hırsızlığı, kimlik hırsızlığı ve telefon dinleme gibi kötü amaçlı işlemler ciddi bir sonuçlar doğurur. Nesnelerin internetinde mevcut olan güvenlik açıkları bu tehditlerin izinsiz bir biçimde gerçekleşmesini olanaklı hale getirir. Nesnelerin internetinin temel anlamda üç ana tehdidi mevcuttur. Bu tehditler; hırsızlık, sahtekarlık ve kontroldür. Hırsızlık; ekipman çalmak, cihazda saklanmış olan verileri dinleme ve fikir hırsızlığı olarak nitelendirilir. Sahtekarlık, bir sisteme kullanıcı erişimini doğrulama amacıyla yapılan kimlik hırsızlığı ve mevcut sunucu veya veri havuzuna erişimi sağlamak için sahte cihaz kimlik bilgileri oluşturmaktır. Kontrol ise; mevcut sunuculardaki,

cihazlardaki verileri işleme, sistemlerin eylemlerini değiştirme, mevcutta olan sistemin işlevini yok ederek çökmeye zorlamaktır.

Nesnelerin internetinde genel olarak çok farklı yöntemlerde tehlikeler olsa da tüm bu tehlikeler için gelişmiş güvenlik önemleri bir güvenlik ağı ile oluşturulabilir [24]. Güvenlik ağı oluşturma da ilk akla gelen yöntem veri şifrelemedir. Veri şifreleme yöntemi ile cihazda olan verileri herhangi bir bilgisayar korsanı tarafından çalınrsa da kimlik doğrulaması ile orijinal verilere erişim engellenir. İmza kodu sertifikaları diğer bir güvenlik ağı yöntemidir. Bu yöntemde bir cihazda kodun çalışabilmesi için doğrulanmış olması gerekmektedir. Kodu düzenleyen dışından hiç kimse mevcut kodu yok edememesini ve düzenleyememesini sağlayan dijital bir imza vardır. Bu imza sayesinde veriler öznel olarak şifrelenmiş olur. Güvenlik ağı yöntemlerin temelinde cihazın korunması vardır. Günümüzde ve gelecekte mevcut olan cihaz ve sunucu sayısı giderek artmaktadır. Buna bağlı olarak tehdit yöntemleri de artmaktadır. Temel yollardan biri de işlevin gerçekleştiği cihazı korumaktır. Güvenlik ağı yöntemlerinin nesnelerin internetine uyumlu olduğu bir diğer güvenlikte bulut güvenliğidir. Nesnelerin interneti sunucuları derin öğrenme yöntemleri kullanarak ağ güvenliğini sağlayan bir çevre savunması oluşturmayı hedeflerler.

Nesnelerin İnternetinde mevcut olan güvenliğin ihlalini gerçekleştiren kullanıcılara davetsiz misafir denir [25]. Davetsiz misafir ile ilgili en önemli basamak tespitin nasıl olacağıdır. IoT' de saldırı tespit sistemi olarak adlandırılan işlem internet sunucularının koruyucusudur. IoT sunucularının ve cihazlarının birçoğunun uzaktan kontrol özelliği sebebi ile halka açık internete maruz kalır. Saldırı tespit sistemi kullanıcıları koruduğu gibi servis sağlayıcılarını da korur. Bu nedenle internetle birlikte riskler artar. Doğal olarak saldırı tespit sisteminde kullanılan tekniklerin düzenli olarak karşılaşılan problemlere göre güncellenmesi gerekmektedir. Ek olarak anormallik tespit sistemi olarak bilinen yöntemdeki amaç bizzat bilinmeyen risklerin tespit edilmesi ile birlikte savunma da etkin bir rol oynamaktır.

Nesnelerin internetinde önemli birçok temel özellik vardır. Fakat bu özelliklerde kapsamlı algılama, güvenilir iletim ve akıllı işleme en çok üzerinde durulan özelliklerdendir. Kapsamlı algılama olarak nitelendirilen özellik nesne bilgilerinin her zaman ve her yerden elde edilmesi anlamına gelir. Güvenilir iletim özelliğinde elde edilen nesneleredeki bilgilerin iletiminde eksik ya da güvensiz bir iletim olmamasını barındırır. Akıllı işleme ise toplanan nesne bilgilerinin iletilmesi gereken yere iletilmeden önceki analizleri ile ilgilenir. Günümüzde teknolojinin sürekli olarak yeniliklere ortak olması sebebiyle nesnelerin interneti bu gelişmeden payını güvenlik sorunları ile ele almıştır.

Teknoloji çağının en önlenemez dijital problemlerinden biri olan yanlış bilgi yayılımı ve insanların bu güvenlik açığını kötüye kullanmaları büyük bir problem oluşturmaktadır. Nesnelerin interneti yapısı gereği katmanlı bir sensör ağından oluşmaktadır. Bununla birlikte ağ akışını kontrol altında tutmak çok ciddi bir problem olarak günümüzde yer edinmiştir.

İletim ağlarında işlevselliklerine göre belirli katmanlar vardır. Bu katmanların kendilerine ait iletişim protokolleri bulunmaktadır. İletişim protokolleri ağlara göre farklılık gösterirler. Örnek olarak geleneksel ağlarda uygulama katmanında Köprü Metni Aktarım Protokolü (HTTP) kullanılır. IoT ağ katmanında ise iletişim protokolü olarak datagram taşıma katmanı güvenliği (DTLS) kullanılır. Örneklerden görülebileceği üzere farklı ağ katmanlarında farklı iletişim protokolleri kullanılır.

Nesnelerin İnterneti Sunucularında Saldırı Tespit Sistemi

Nesnelerin interneti katman mimarisinde mevcut olan katmanları birbirlerine bağlamak için derin sinir ağları ve çeşitli algoritmalar kullanılmaktadır [26]. Siber güvenlikte en önemli kontrol yöntemi ağdaki trafik akışını tanımlamaktır. Bu tanımlamayla birlikte ağa izinsiz bir giriş trafik içerisinde bulunan kırmızı bayrakları devreye sokar. Günümüzde sistemlerdeki trafik akışı artmaktadır. Bu artış ile birlikte geleneksel tespit yöntemleri etkisiz hale gelmektedir. Geleneksel olan yöntemlerde trafik akışını tanımlamak için birçok makine öğrenimi algoritması önerilmiştir. Güvenlik sorunları tespit etmek ve analiz etmek için derin öğrenme yöntemleri pek çok şekilde uygulanmaktadır. Son zamanlarda, saldırı tespit sistemi olarak hibrit bir model kullanılmaktadır. Bu hibrit yöntemlerde prosedüre göre farklı derin öğrenme yöntemleri kullanılır ve ağdaki veri hesaplaması istatistiksel yöntemler ile trafik ağını ortaya koyar.

Saldırı tespit sisteminde olması gereken standart veriler ve olmaması gereken standart olmayan verilerin birbirinden ayrılma zorluğu her zaman vardır [27]. Bu zorluğu aşmak için normal ve anormal giriş verileri için ayrımın detaylı bir şekilde yapılmış olması gerekir. Bu doğrultu da kötü amaçlı verilerin ne gibi özelliklerde olabileceği, normal verilere göre olabilecek farklılıkları tam olarak sınıflandırılmalıdır. Bununla ilgili ağa tanımlanmış olan belirli bir kod düğüm arasındaki mesafe otomatik olarak oluşturulur. Bu otomatikleştirilmenin sebebi farklı mesafe olması durumunda verinin anormal yani kötü amaçlı olduğunu bildirir. Saldırı tespit sisteminde ayırt etmenin zor olduğu diğer bir durum olağan zehirlenme olarak adlandırılan anormal veriyi tespit etmedir. Anormal olan verinin ağı manipüle etmesini engellemek ve artan trafik akışında herhangi bir bilgi manipülasyonuna dahil olmamasını kontrol etmektir. Ağdaki kötü amaçlı anormallikleri tespit etmek için çeşitli yöntemler kullanılabilir. Otomatik kodlayıcı

bu yöntemlerden biridir. Ön eğitim, devreye alma ve ince ayar prosedürlerinin kullanıldığı otomatik kodlayıcı yöntemi temel olarak bileşenleri giriş katmanı, çıkış katmanı ve gizli katman olarak ayırır. Derin öğrenme yöntemlerinde çıktılar diğer katmanların girdisi olarak kullanılabilir. Sınıflandırma buna uygun bir şekilde denetimli olarak yapılır. Hibrit olarak yapılan bu yöntemler denetimli şekilde ilgili karmaşıklığı azaltarak veri algılamasını da iyileştirir. Araştırmalara göre bir ağdaki trafik akışının sekiz birinin bilinmediği ortaya çıkmıştır. Derin öğrenme yöntemleri bahsedilen bu bilinmeyen akışlar üzerinde istatistiksel işlemler gerçekleştirerek doğruluğunu artırabilir.

Günümüzde nesnelerin interneti katman mimarisinde kullanılan mevcut makine öğrenimi güvenlik yöntemleri vardır [28]. Fakat bu yöntemlerinde yetersiz kaldığı problemler ortaya çıkmaktadır. Ayrıca sürekli gelişen teknoloji sistemleri ile birlikte ele alınan bir yöntemde derin öğrenme olarak adlandırılır. Derin öğrenme örüntü tanıma, doğal dil işleme ve ağ güvenliği olmak üzere çok fazla alanda aktif olarak işlenen bir yöntemdir. Büyük verilerin analizinde kullanılan bu yöntem yetkisiz erişimi tespit etmek ve incelemek üzere işlemler gerçekleştirir. Bir sistem, olasılıksal ve deterministik olmak üzere iki makine öğrenimi ilkeleri ile çalışır. Bu ilkelerden deterministik makine öğrenimi yöntemi, örnek olan küçük veri kümelerini ele alır. Ele aldığı bu küçük kümelerin düzenli kalıplarında olan sapmaları bulmaya çalışır. Analizlerin sonucu model de ki mevcut bilgiler ile değerlendirilir ve ortalama değerlere göre farklı çıkan değerler anormal veri istilacı olarak kabul edilir. Diğer bir makine öğrenimi yöntemi olan olasılıksal yöntemde mevcut olan kalıplar değerlendirilir. Tüm sistemin verilerinde olan değişik karakter algılanır. Diğer yöntemlere göre daha etkilidir. Çünkü yöntemin değerlendirme sonuçları kesindir. Derin öğrenme yönteminde yukarıdan aşağıya doğru olan çıktılar sayısal olarak incelenir. Yapılan fonksiyonel modellemeler ile katman işlevleri belirlenir ve bu sayede sistemlerin derinlemesine analizleri gerçekleştirilir. Asıl amacı olan saldırı tespitini yapmada büyük kolaylık sağlayan algoritma sistemi, mevcut sınıflandırma rolüne göre iyi bir analiz sonucu oluşturur. Bu saldırı tespit modelinde mevcut sınıf başına olan ortalama hata kullanılarak veri kümeleri üzerinden hata oranı tespit edilir.

Bir sistemdeki ağ saldırısını tespit etmek için derin bir sinir ağı oluşturmak gerekir [29]. Sistemdeki her bileşen ağın bir modülü olarak kabul edilir ve çoklu modüller şeklinde kademeli bir ilişki vardır. Sistem bir ön işleme modülü, bir öznitelik çıkarma modülü, bir sınıflandırma karar modülü ve bir çıkış modülünden oluşmaktadır. Ön işleme modülünün işlevi verilerin boyutlarını değiştirmeden sinir ağlarına giriş için uygun değerlere dönüştürmektir. Özellik çıkarma modülünün işlevi temel olarak özellikleri ayıklamak ve depolamak için

kullanılan aynı zamanda sistemin çekirdek parçası olan katmandan oluşmaktadır. Sınıflandırma karar modülünün işlevi temel olarak modülünün çıktı bilgilerini doğrusal olmayan haritalama ile en-katmanlı algılayıcı model haline getirmektir. Çıkış modelinin işlevi sonuç sınıflandırma olasılığını normalleştirmek için softmax regresyonu kullanılmaktadır. Saldırı tespit sistemi incelendiğinde görülür ki; sistemin köklü bir geçmişinin olması ve geleneksel makine öğrenimi yöntemlerine göre fazlaca yeterli oluşu büyük bir fayda sağlar. Mevcut olarak değişmeye ve gelişmeye devam etmekte olan bu sistem daha verimli ve günümüz ilerleyen teknolojiye uyum sağlamayı hedefler.

Sonuçlar

Çalışmada literatürde bulunan nesnelerin internetinde (IoT) güvenlik sorunları ile ilgili çeşitli çalışmalar incelenmiştir. Çalışmalar arasında nesnelerin internetinde siber güvenlik ve saldırı tespitleri için makine öğrenimi algoritmalarının kullanılması, güvenlik zorlukları ve tehditlerinin incelenmesi, etik yasal sorunlar, güvenlik önlemleri ve çözümleri gibi konulara değinilmiştir. Nesnelerin interneti hayatımızın çoğu alanında bulunduğundan bu çalışmalar güvenlik sorunlarını anlamak ve çözümler üretebilmek için önem sağlamaktadır.

Nesnelerin interneti ve güvenliği konusunda en önemli detayın iyi bir sınıflandırma ile veri tespiti yapılabilmesi olduğu görülmüştür. Ayrıca olası tehdit unsurlarını tespit etme önemi de vurgulanmıştır. Nesnelerin interneti katman mimarisinde olan tüm katmanların işlevlerinin bilinmesi ve işlevlerine uygun gizlilik korumalarının mevcut olması gerekmektedir. Nesnelerin interneti güvenlik teknolojisinde sürekli olarak gelişen bir analiz sistemi kullanılmalıdır. Bu sistem ile her geçen gün karşılaşılan farklı sorunlara uygun yeni çözüm yöntemleri geliştirilmektedir. Nesnelerin interneti katman mimarisinde önemli bir yere sahip olan saldırı tespit konusunun derin öğrenme ile işlenmesi yapılmıştır. İşlenen saldırı tespit sistemine göre derin öğrenme yöntemleri incelenmiş ve yorumlanmıştır.

Kaynaklar

- [1] Sorri, K., Mustafee, N., & Seppänen, M. (2022). Revisiting IoT definitions: A framework towards comprehensive use. *Technological Forecasting and Social Change*, 179, 121623.
- [2] Kouicem, D. E., Bouabdallah, A., & Lakhlef, H. (2018). Internet of things security: A top-down survey. *Computer Networks*, 141, 199-221.
- [3] Eluwole, O. T., Udoh, N., Ojo, M., Okoro, C., & Akinyoade, A. J. (2018). From 1G to 5G, what next?. *IAENG International Journal of Computer Science*, 45(3).
- [4] Pacis, D. M. M., Subido Jr, E. D., & Bugtai, N. T. (2017). Research on the application of internet of things (IoT) technology towards a green manufacturing industry: A literature review. In *DLSU Research Congress* (pp. 1-11).
- [5] Fersi, G. (2015, June). Middleware for internet of things: A study. In *2015 International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems* (pp. 230-235). IEEE.
- [6] Díaz, M., Martín, C., & Rubio, B. (2016). State-of-the-art, challenges, and open issues in the integration of Internet of things and cloud computing. *Journal of Network and Computer applications*, 67, 99-117.
- [7] Sai Ramesh, L., Sundar, S. S., Selvakumar, K., & Sabena, S. (2021). Tracking of wearable IoT devices through WAP using intelligent rule-based location aware approach. *Journal of Information & Knowledge Management*, 20(supp01), 2140005.
- [8] Elazhary, H. (2019). Internet of Things (IoT), mobile cloud, cloudlet, mobile IoT, IoT cloud, fog, mobile edge, and edge emerging computing paradigms: Disambiguation and research directions. *Journal of network and computer applications*, 128, 105-140.
- [9] Atac, C., & Akleyek, S. (2019). A survey on security threats and solutions in the age of IoT. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (15), 36-42.
- [10] Avcı, İ. (2022). Akıllı evlerde IoT teknolojileri ve siber güvenlik. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (34), 226-233.
- [11] Yıldırım, M., Demiroğlu, U., & Şenol, B. (2021). An in-depth exam of iot, iot core components, iot layers, and attack types. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (28), 665-669.
- [12] Tawalbeh, L. A., Muheidat, F., Tawalbeh, M., & Quwaider, M. (2020). IoT Privacy and security: Challenges and solutions. *Applied Sciences*, 10(12), 4102.

- [13] Öztürk, İ., & Zeybek, B. (2021). Dijitalleşme ve etik sorunlar: Nesnelerin interneti teknolojisini gözetim, gizlilik, güvenlik kapsamında değerlendirme. *İletişim Kuram ve Araştırma Dergisi*, 2021(55), 1-15.
- [14] Satılmış, H., & Akleylek, S. (2021). IoT Güvenliği İçin Kullanılan Makine Öğrenimi ve Derin Öğrenme Modelleri Üzerine bir Derleme. *Bilişim Teknolojileri Dergisi*, 14(4), 457-481.
- [15] Tulgar, M., Zaim, A. H., & Aydın, M. A. (2022). Ulusal Bilgi ve İletişim Güvenliği Rehberi: IOT Güvenliği İçin Bir Uygulama Örneği. *İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 21(42), 353-382.
- [16] Kandır, M. O., Yolaçan, E., & Işık, Ş. (2022). Nesnelrin İnterneti Güvenliği: Ev Ağı Güvenlik İncelemesi ve Değerlendirmesi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 27(2), 803-816.
- [17] Gökdemir, A., & Çalhan, A. (2022). Nesnelerin interneti ortamlarında derin öğrenme ve makine öğrenmesi tabanlı anomali tespiti. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 37(4), 1945-1956.
- [18] Kiani, F., & Taş, O. (2021). Nesnelerin İnterneti (IoT) ve Kablosuz Algılayıcı Ağların Güvenliğine Yapılan Saldırıların Tespit Edilmesi ve Önlenmesi: Detection and Prevention of Attacks on the Internet of Things (IoT) and Wireless Sensor Networks. *Politeknik Dergisi*.
- [19] Calp, M. H., & Bütüner, R. Detecting the Cyber Attacks on IoT-Based Network Devices Using Machine Learning Algorithms. *Politeknik Dergisi*, 1-1.
- [20] Gönen, S., Barışkan, M. A., Karacayılmaz, G., Alhan, B., Yılmaz, E. N., Artuner, H., & Sindiren, E. (2022). A novel approach to prevention of hello flood attack in iot using machine learning algorithm. *El-Cezeri*, 9(4), 1529-1541.
- [21] Ülker, M., Canbay, Y., & Sağıroğlu, Ş. (2017). Nesnelerin internetinin kişisel, kurumsal ve ulusal bilgi güvenliği açısından incelenmesi. *Türkiye Bilişim Vakfı Bilgisayar Bilimleri ve Mühendisliği Dergisi*, 10(2), 28-41.
- [22] Amarouche, S., & Küçük, K. (2022). MACHINE AND DEEP LEARNING-BASED INTRUSION DETECTION AND COMPARISON IN INTERNET OF THINGS. *Journal of Naval Sciences and Engineering*, 18(2), 333-361.
- [23] Furnell, S. (2013). Hackers, viruses and malicious software. In *Handbook of Internet crime* (pp. 173-193). Willan.

- [24] Palanivelu, R., & Srinivasan, P. S. S. (2020). Safety and security measurement in industrial environment based on smart IOT technology based augmented data recognizing scheme. *Computer communications*, 150, 777-787.
- [25] Omolara, A. E., Alabdulatif, A., Abiodun, O. I., Alawida, M., Alabdulatif, A., & Arshad, H. (2022). The internet of things security: A survey encompassing unexplored areas and new insights. *Computers & Security*, 112, 102494.
- [26] Verhelst, M., & Moons, B. (2017). Embedded deep neural network processing: Algorithmic and processor techniques bring deep learning to iot and edge devices. *IEEE Solid-State Circuits Magazine*, 9(4), 55-65.
- [27] Cahyo, A. N., Sari, A. K., & Riasetiawan, M. (2020, October). Comparison of hybrid intrusion detection system. In *2020 12th international conference on information technology and electrical engineering (ICITEE)* (pp. 92-97). IEEE.
- [28] Hussain, F., Hussain, R., Hassan, S. A., & Hossain, E. (2020). Machine learning in IoT security: Current solutions and future challenges. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 22(3), 1686-1721.
- [29] Mehra, M., Saxena, S., Sankaranarayanan, S., Tom, R. J., & Veeramanikandan, M. (2018). IoT based hydroponics system using Deep Neural Networks. *Computers and electronics in agriculture*, 155, 473-486.

4. Bölüm

Yapay Zekâ Kullanımı ile Yazılım Proje Dokümantasyonunun Hazırlanması

Fatih YÜCALAR¹
Akın ÖZÇİFT²

¹ Doç. Dr.; Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Hasan Ferdi Turgutlu Teknoloji Fakültesi, Yazılım Mühendisliği Bölümü. fatih.yucalar@cbu.edu.tr; ORCID No: 0000-0002-1006-2227

² Prof. Dr.; Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Hasan Ferdi Turgutlu Teknoloji Fakültesi, Yazılım Mühendisliği Bölümü. akin.ozcift@cbu.edu.tr; ORCID No: 0000-0002-5317-5678

Özet

Yazılım projelerinde yapay zekâ (AI) kullanarak dokümantasyon hazırlama, modern yazılım geliştirme süreçlerinde verimliliği artıran ve hataları minimize eden önemli bir yenilik olarak son zamanlarda öne çıkmaktadır. AI destekli dokümantasyon araçları, otomatik olarak kodun açıklamasını yapabilmekte, kullanıcı rehberleri oluşturabilmekte ve güncellemeler sırasında dokümantasyonun tutarlılığını sağlamaktadır. Bu, yazılım mühendislerine zaman kazandırırken, aynı zamanda da dokümantasyon kalitesini artırmaktadır. AI'nın doğal dil işleme (NLP) tekniklerini kullanarak yapılan bu tür dokümantasyonlar, kodun ve yazılım süreçlerinin anlaşılmasını kolaylaştırır. Bunun yanı sıra, AI ile entegre olan araçlar, kullanıcıların dokümantasyon ihtiyaçlarına hızlı yanıtlar vererek interaktif bir öğrenme deneyimi sunabilir. Sonuç olarak, yapay zekâ tabanlı dokümantasyon, yazılım geliştirme döngüsünü daha dinamik ve kullanıcı dostu hale getirerek, yazılımcılara ve son kullanıcılara büyük faydalar sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Yapay Zekâ, Yazılım Proje Dokümanı, Otomasyon, Yazılım, Doğal Dil İşleme.

GİRİŞ

Yazılım projelerinde dokümantasyon, bir projenin başarısını ve uzun vadeli sürdürülebilirliğini belirleyen en önemli unsurlardan biridir. Dokümantasyonun amacı, yazılım geliştirme sürecinde ve sonrasında, kullanıcıların, geliştiricilerin ve diğer paydaşların sistemi anlamalarını, kullanmalarını ve bakımını yapmalarını sağlamaktır. Geleneksel dokümantasyon yöntemleri, genellikle manuel olarak yazılan ve güncellenen metin tabanlı belgelerden oluşur. Bu süreç, zaman alıcı olmasının yanı sıra, insan hatalarına da açıktır (Rajlich & Bennett, 2000). Ancak, son yıllarda yapay zekâ (AI) teknolojilerinin yazılım mühendisliği alanlarına entegrasyonu, dokümantasyon süreçlerinde devrim niteliğinde değişiklikleri beraberinde getirmiştir (Feldt et al., 2021).

Geleneksel dokümantasyon yöntemleri, genellikle yazılım geliştirme sürecinden bağımsız bir adım olarak ele alınır. Bu yöntemler, yazılımın işlevselliklerini, kodun yapısını ve kullanıcı rehberlerini detaylı bir şekilde açıklamak için yoğun bir çaba gerektirir (Uddin & Robillard, 2015). Dokümantasyonun bu tür bir yaklaşımla hazırlanması, özellikle büyük ve karmaşık projelerde zaman alıcı olabilir ve proje ilerledikçe dokümantasyonun güncel tutulmasını zorlaştırabilir. Bu nedenle, geleneksel yöntemler, yazılım geliştirme sürecinde önemli zaman kayıplarına ve iş gücü maliyetlerine yol açabilir.

Yapay zekâ tabanlı yöntemler ise dokümantasyon süreçlerini daha verimli hale getirme potansiyeline sahiptir. AI, özellikle doğal dil işleme (NLP) tekniklerini kullanarak kodun analiz edilmesi ve bu analizden yola çıkarak dokümantasyonun otomatik olarak oluşturulması sürecinde etkin bir rol oynar (Sharma et al., 2019). AI tabanlı dokümantasyon araçları, kodun anlamını ve işlevselliğini ele alarak, bu bilgiyi anlaşılır bir dilde ifade edebilir. Böylece yazılım geliştiriciler, kodu yazarken veya güncellerken aynı anda dokümantasyonun da otomatik olarak güncellenmesini sağlayabilirler (Liao et al., 2020).

AI'nın en büyük avantajlarından biri, dokümantasyonun sürekli olarak güncellenebilir ve yazılımın mevcut durumunu yansıtabilir olmasıdır. Bu durum özellikle çevik yazılım geliştirme metodolojilerini kullanan yazılım firmalarının sürekli entegrasyon ve sürekli teslimat (CI/CD) süreçlerinde kritik bir rol oynar. Geleneksel yöntemlerde, dokümantasyonun güncellenmesi genellikle manuel bir süreç olduğu için yazılımın gelişimi ile dokümantasyonun senkronize olması zorlaşabilir. Ancak, AI tabanlı sistemler, yazılım geliştirme süreci boyunca yapılan her değişikliği otomatik olarak izleyebilir ve dokümantasyonu bu değişikliklere uyacak şekilde güncelleyebilir (Vasilescu et al., 2017).

Yapay zekâ tabanlı dokümantasyonun sunduğu bir diğer önemli avantaj ise, kullanıcı ihtiyaçlarına daha iyi cevap verebilmesidir. AI, kullanıcıların belirli bir kod parçası veya işlevsellik hakkında ne tür bilgilere ihtiyaç duyabileceğini öğrenerek,

dokümantasyonu bu ihtiyaçlara göre özelleştirebilir. Bu sayede, kullanıcılar ihtiyaç duydukları bilgilere daha hızlı ve kolay bir şekilde ulaşabilirler (Feldt et al., 2021). Ayrıca, AI'nın öğrenme yetenekleri sayesinde dokümantasyonun kalitesi zamanla daha da artabilir ve kullanıcı deneyimi iyileştirilebilir.

Bununla birlikte, yapay zekâ tabanlı dokümantasyon yöntemlerinin de bazı sınırlamaları bulunmaktadır. AI'nın etkinliği, kullanılan veri setlerinin kalitesine ve miktarına bağlıdır. Yetersiz veya hatalı verilerle eğitilmiş bir AI modeli, yanlış veya eksik bir dokümantasyonun üretilmesine neden olabilir. Ayrıca, AI tabanlı araçların entegrasyonu, bazı durumlarda mevcut yazılım geliştirme süreçleriyle uyumlu olmayabilir ve ek maliyetler doğurabilir (Sharma et al., 2019).

Geleneksel yöntemler ise, özellikle çok spesifik ve özelleştirilmiş projelerde hala önemli bir rol oynamaktadır. Manuel olarak yazılan dokümantasyon, yazılım mühendislerinin ve teknik yazarların projeye özel gereksinimleri ve karmaşıklıkları daha iyi ifade etmelerini sağlar. Ayrıca, bazı durumlarda, manuel dokümantasyon daha güvenilir ve kontrollü bir süreç sunabilir (Dagenais & Robillard, 2010).

Sonuç olarak, yapay zekâ tabanlı dokümantasyon yöntemleri, geleneksel yöntemlerle karşılaştırıldığında birçok avantaj sunmaktadır. AI'nın otomatikleştirilmiş ve dinamik yapısı, dokümantasyon süreçlerinde verimliliği artırmakta ve yazılım projelerinin sürdürülebilirliğini sağlamaktadır. Ancak, geleneksel yöntemler, özellikle karmaşık ve özelleştirilmiş projelerde hala değerini korumaktadır. Bu çalışmanın devamında, yapay zekâ tabanlı dokümantasyon yöntemleri ile geleneksel yöntemlerin detaylı bir karşılaştırması yapılacak ve her iki yaklaşımın yazılım mühendisliği alanına katkıları incelenecektir.

YAPAY ZEKÂ DESTEKLİ DOKÜMANTASYONUN TEMELLERİ

Bu başlık altında yapay zekânın dokümantasyon hazırlama sürecinde kullanımına değinilerek, doğal dil işleme (NLP) tekniklerinin dokümantasyonda hazırlamada nasıl bir rol üstlendiği konusu ele alınacaktır.

Yapay Zekânın Dokümantasyon Hazırlama Sürecinde Kullanımı

Yazılım geliştirme süreçlerinde dokümantasyon, projelerin sürdürülebilirliğini ve uzun vadede bakımını sağlamak için kritik bir bileşen olarak kabul edilir. Geleneksel olarak, dokümantasyon hazırlama işlemi manuel olarak gerçekleştirilir ve bu süreç genellikle zaman alıcı, maliyetli ve hata yapmaya açık olabilir. Ancak, yapay zekâ (AI) teknolojilerinin bu alana entegrasyonu, dokümantasyon hazırlama süreçlerinde önemli yenilikler getirmiştir.

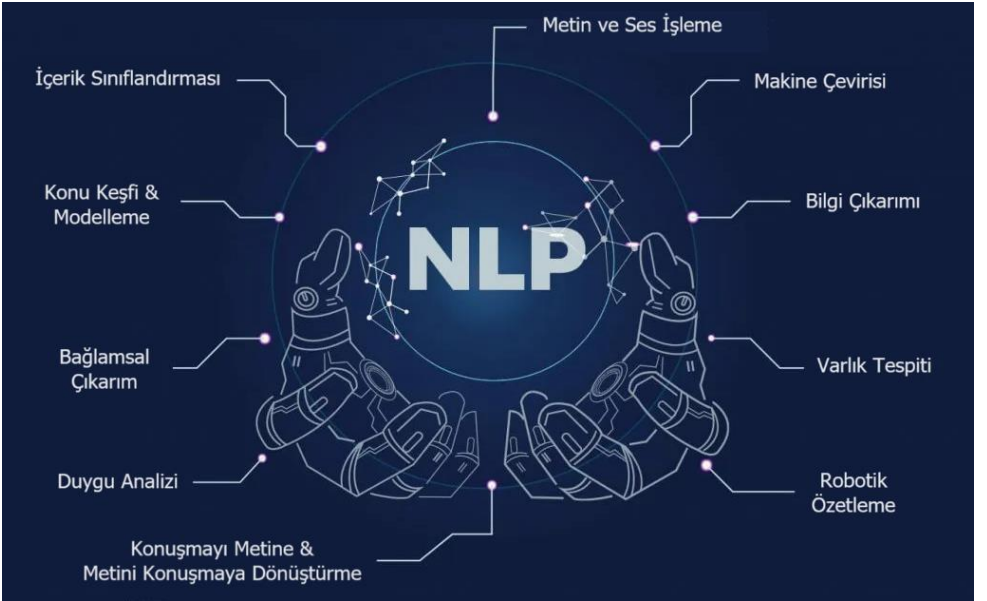
Yapay zekâ destekli dokümantasyon, yazılım geliştirme sürecinde kodu otomatik olarak analiz edebilme ve bu analizden yola çıkarak tutarlı ve doğru dokümantasyon oluşturma yeteneğine sahiptir. Bu tür AI sistemleri, geliştiricilerin manuel olarak

yazmak zorunda oldukları açıklamaları otomatikleştirerek zamandan tasarruf sağlar ve insan hatası riskini azaltır (Sharma et al., 2019). Bununla birlikte, AI destekli dokümantasyon sistemleri, yazılım geliştirme süreçlerine entegre edilerek, kod değişiklikleri meydana geldikçe dokümantasyonun otomatik olarak güncellenmesini sağlar (Liao et al., 2020).

Yapay zekâ tabanlı dokümantasyon araçları, genellikle doğal dil işleme (NLP) tekniklerini kullanır. NLP, insan dilini anlama ve işleme konusunda gelişmiş algoritmalar sunarak, dokümantasyonun doğru ve anlaşılır bir şekilde oluşturulmasını mümkün kılar. Bu teknikler, özellikle karmaşık yazılım sistemlerinde, geliştiricilerin kodun nasıl çalıştığını ve ne amaçla kullanıldığını daha iyi anlamalarına yardımcı olur (Feldt et al., 2021).

Doğal Dil İşleme Tekniklerinin Dokümantasyon Hazırlamadaki Rolü

Doğal Dil İşleme (NLP), yapay zekânın bir alt alanı olarak, bilgisayarların insan dilini anlaması, analiz etmesi ve üretmesi üzerine odaklanır. NLP teknikleri, dokümantasyon süreçlerinde çeşitli yollarla kullanılmaktadır. Bu tekniklerin temel amacı, yazılı metinlerden anlam çıkarma, özetleme yapma ve doğal dilde çıktılar üretme gibi işlemleri gerçekleştirmektir. Günlük hayatta ve iş yaşamında karşımıza çıkan NLP kullanım alanları Şekil 1’de görülmektedir.



Şekil 1. NLP kullanım alanları

NLP'nin dokümantasyon hazırlama sürecinde kullanılmasının en önemli faydalarından biri, kodun işlevselliğini ve yapısını otomatik olarak analiz ederek, bu bilgiyi anlaşılır ve erişilebilir bir dilde sunabilmesidir. Bu sayede, geliştiricilerin ve kullanıcıların, yazılımın nasıl çalıştığını daha iyi anlamaları sağlanır (Liao et al., 2020). NLP tabanlı araçlar, ayrıca kod yorumlarını ve açıklamalarını otomatik olarak oluşturabilir veya var olan yorumları iyileştirebilir. Bu, özellikle büyük ve karmaşık projelerde, dokümantasyonun kalitesini ve doğruluğunu artırır (Sharma et al., 2019).

Bir başka önemli NLP uygulaması, yazılım projelerinde Sürekli Entegrasyon (Continuous Integration – CI) süreçleri ile dokümantasyonun senkronizasyonunu sağlamaktır. NLP teknikleri, kod değişikliklerini izleyerek, bu değişikliklere bağlı olarak dokümantasyonu güncelleyebilir ve bu sayede dokümantasyonun her zaman güncel kalmasını sağlar (Vasilescu et al., 2017). Bu otomasyon süreci, yazılım geliştirme sürecinde verimliliği artırırken, aynı zamanda geliştiricilerin manuel olarak dokümantasyon yazma yükünü de hafifletir.

NLP'nin sunduğu bir diğer önemli özellik ise, metin madenciliği ve metin sınıflandırma teknikleri ile büyük miktarda dokümanı analiz ederek, benzer bilgilere sahip olan bölümleri bir araya getirebilmesidir. Bu, özellikle yazılım dokümantasyonunun kapsamlı bir şekilde organize edilmesi gerektiğinde, kullanıcıların ihtiyaç duydukları bilgilere daha hızlı erişmelerini sağlar (Feldt et al., 2021).

Sonuç olarak, doğal dil işleme teknikleri, yapay zekâ destekli dokümantasyon araçlarının merkezinde yer alır ve dokümantasyon süreçlerinin otomatikleştirilmesi, kalitesinin artırılması ve güncellenmesi açısından kritik bir rol oynar. Bu tekniklerin gelişimi, yazılım mühendisliği alanında daha verimli, doğru ve kullanıcı dostu dokümantasyonların üretilmesine olanak tanımaktadır.

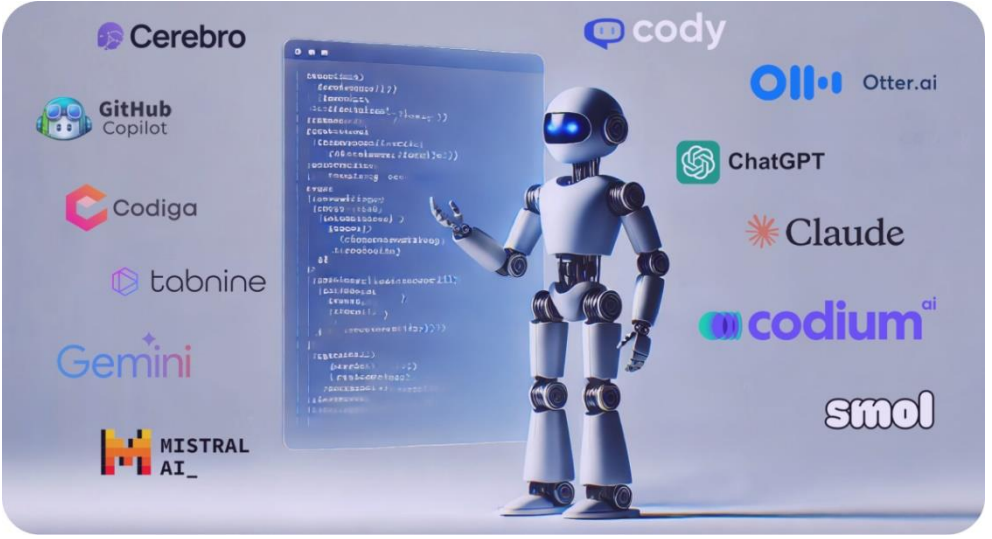
OTOMATİK DOKÜMANTASYON ARAÇLARI

Bu başlık altında yazılım projelerinde kullanılabilecek yapay zekâ tabanlı kod yorumlama ve açıklama araçlarına değinilerek, dokümantasyonun otomatik olarak güncellenmesi ve yönetimi konusu ele alınacaktır.

Yapay Zekâ Tabanlı Kod Yorumlama ve Açıklama Araçları

Yazılım geliştirme süreçlerinde, kodun anlaşılabilir ve sürdürülebilir olması için dokümantasyon kritik bir rol oynamaktadır. Geleneksel yöntemlerde bu dokümantasyon, genellikle manuel olarak hazırlanır; ancak bu süreç zaman alıcı ve hata yapmaya açık olabilir. Yapay zekâ (AI) tabanlı kod yorumlama ve açıklama araçları, bu süreci otomatikleştirerek geliştiricilere büyük bir kolaylık sağlamaktadır. Bu araçlar, kodun işlevselliğini otomatik olarak analiz ederek, geliştiriciye kodun ne yaptığını açıklayan yorumlar üretir (Wang, Li, & Shi, 2021).

AI tabanlı bu araçlar, genellikle makine öğrenmesi ve doğal dil işleme (NLP) tekniklerini kullanarak, kodun anlamını ve işlevini çıkarır. Örneğin, bir kod bloğunun hangi amaca hizmet ettiğini belirlemek ve bunu doğal dilde açıklamak için kullanılan bu araçlar, yazılım dokümantasyonunun tutarlı ve anlaşılır olmasını sağlar. Bu araçlar, kodun karmaşıklığına rağmen anlamını netleştirerek, yeni geliştiricilerin projeye katılımını hızlandırır ve kodun bakımını kolaylaştırır (Senn, 2019). Özellikle büyük ve karmaşık projelerde, kodun belirli bölümlerinin ne yaptığına dair net açıklamalar yapmak zor olabilir. Şekil 2’de AI tabanlı kod yorumlama ve açıklama araçları görülmektedir.



Şekil 2. AI tabanlı kod yorumlama ve açıklama araçları

AI tabanlı kod yorumlama araçları, bu tür durumlarda etkili bir çözüm sunar. Bu araçlar, kodun geçmişini, değişikliklerini ve diğer metrikleri analiz ederek, kapsamlı açıklamalar sunar. Bu açıklamalar, yalnızca kodun işlevselliğini anlamayı kolaylaştırmakla kalmaz, aynı zamanda gelecekteki güncellemeler ve bakım süreçleri için de önemli bir rehber görevi görür (Tufano et al., 2019).

Dokümantasyonun Otomatik Güncellenmesi ve Yönetimi

Yazılım projelerinde dokümantasyonun güncel tutulması, yazılımın uzun ömürlü ve sürdürülebilir olmasını sağlamak için gereklidir. Geleneksel yöntemlerde, dokümantasyon genellikle manuel olarak güncellenir; bu da hatalara ve eksikliklere yol açabilir. Yapay zekâ tabanlı araçlar, dokümantasyonun otomatik olarak güncellenmesini ve yönetilmesini sağlayarak bu zorlukların üstesinden gelir (Gao et al., 2020).

Bu araçlar, Sürekli Entegrasyon (Continuous Integration – CI) ve Sürekli Teslimat (Continuous Deployment – CD) süreçlerine entegre edilerek, kod değişiklikleri meydana geldikçe dokümantasyonun otomatik olarak güncellenmesini sağlar. Bu sayede, dokümantasyonun her zaman kodla uyumlu olması sağlanır ve geliştiricilerin manuel güncelleme yapma ihtiyacı ortadan kalkar. Örneğin, bir fonksiyonun adı veya işlevi değiştirildiğinde, yapay zekâ tabanlı araçlar bu değişiklikleri tespit eder ve ilgili dokümantasyonu otomatik olarak günceller (Allamanis, Barr, Bird, & Sutton, 2018).

Dokümantasyonun otomatik olarak güncellenmesi, özellikle büyük ve dinamik projelerde büyük bir avantaj sağlar. Geliştiriciler, projenin herhangi bir aşamasında doğru ve güncel bilgiye erişebilirler, bu da hem geliştirme sürecini hızlandırır hem de yazılımın genel kalitesini artırır. Ayrıca, bu tür araçlar, dokümantasyonun kapsamlı bir şekilde organize edilmesini sağlayarak, gerekli bilgilere kolayca ulaşılmasını mümkün kılar (Vasilescu et al., 2017). Yapay zekâ tabanlı kod yorumlama ve açıklama araçları ile dokümantasyonun otomatik güncellenmesi, yazılım geliştirme süreçlerinde verimliliği ve doğruluğu artıran önemli yeniliklerdir. Bu araçlar, yazılımın anlaşılabilirliğini ve sürdürülebilirliğini artırarak, geliştiricilere büyük bir kolaylık sağlar.

YAZILIM GELİŞTİRME SÜREÇLERİNDE VERİMLİLİK ARTIŞI

Bu başlık altında yazılım projelerinde yapay zekâ kullanımının yazılım geliştiricilerin ve mühendislerin iş yüküne ne gibi yararlar sağlayacağı konusu ele alınarak, yazılım geliştirme süreci boyunca ortaya çıkan dokümanların kalitesini arttırmada yapay zekânın nasıl katkı sağlayacağına değinilecektir.

Yapay Zekânın Yazılım Mühendislerinin İş Yükünü Hafifletmedeki Rolü

Yazılım mühendisliği, karmaşık ve zaman alıcı süreçleri içeren bir alandır. Geleneksel yazılım geliştirme yöntemlerinde, geliştiriciler büyük ölçüde kod yazma, yazılan kodu test etme, dokümantasyon oluşturma ve hataları düzeltme gibi görevlerle meşgul olurlar. Ancak, yapay zekâ (AI) teknolojilerinin bu alana entegrasyonu, yazılım mühendislerinin iş yükünü önemli ölçüde hafifletmiştir. AI, özellikle kod analizi, hata tespiti, otomatik düzeltme ve dokümantasyon gibi süreçlerde yazılım mühendislerinin daha hızlı ve verimli çalışmasını sağlamaktadır (Allamanis, Barr, Bird, & Sutton, 2018).

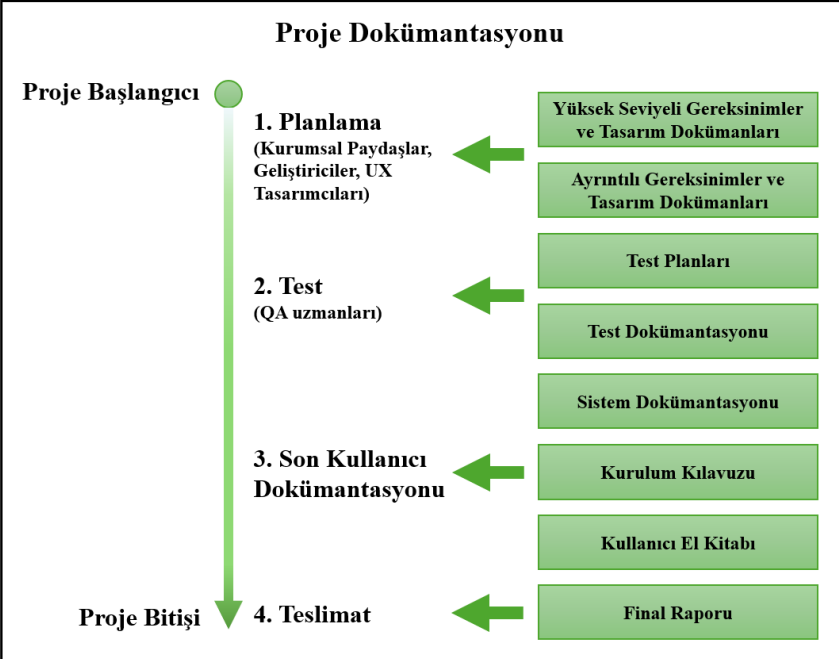
AI tabanlı araçlar, yazılım mühendislerinin rutin ve tekrarlayan görevleri otomatikleştirmesine yardımcı olur. Bu araçlar, kodun analizi sırasında potansiyel hataları belirleyebilir ve hatta bu hataları otomatik olarak düzeltebilir. Bu durum, mühendislerin daha karmaşık ve yaratıcı görevlere odaklanmasını sağlar. Örneğin, AI destekli hata tespit araçları, kodda bulunan potansiyel güvenlik açıklarını veya

performans sorunlarını otomatik olarak tespit eder ve mühendisleri bu konuda bilgilendirir (Tufano et al., 2019). Bu sayede, manuel kod gözden geçirme süreci hızlanır ve daha az hata yapılır.

Ayrıca, AI'nın yazılım geliştirme süreçlerindeki en önemli katkılarından biri, sürekli entegrasyon ve sürekli teslimat süreçlerine entegrasyonudur. Bu süreçler, kodun her aşamada otomatik olarak test edilmesini ve hataların anında tespit edilmesini sağlar. Bu yazılım geliştirme sürecinin genel verimliliğini artırırken, aynı zamanda yazılım geliştiricilerin üzerinde çalıştıkları projelerin daha hızlı ve hatasız bir şekilde teslim edilmesine olanak tanır (Gao et al., 2020).

Dokümantasyon Kalitesinin Artırılması ve Hataların Önlenmesi

Yazılım projelerinde dokümantasyonun kalitesi, geliştiricilerin projeyi anlaması, hataları tespit etmesi ve düzeltmesi açısından kritik öneme sahiptir. Geliştiricilerin dışında yazılım kalite güvence uzmanları, kurumsal paydaşlar ve son kullanıcılar açısından da projenin çeşitli aşamalarında ortaya çıkan son çıktılar yani dokümantasyonlar önemlidir. Şekil 3'te bir yazılım projesi süresince ortaya çıkan dokümanlar görülmektedir.



Şekil 3. Yazılım projesi içerisinde ortaya çıkan dokümanlar

Geleneksel yöntemlerde, dokümantasyon manuel olarak hazırlanır ve bu süreç genellikle hatalara açık olabilir. Ancak, AI tabanlı dokümantasyon araçları, bu süreci otomatikleştirerek dokümantasyonun kalitesini artırır ve hataları en aza indirir (Senn, 2019).

AI, dokümantasyon sürecinde doğal dil işleme (NLP) tekniklerini kullanarak, kodun işlevselliğini ve yapısını analiz eder ve bu analizden yola çıkarak dokümantasyon oluşturur. Bu sayede, yazılımın her aşamasında doğru ve tutarlı bir dokümantasyon sağlanır. AI tabanlı araçlar, ayrıca dokümantasyonu otomatik olarak güncelleyerek, yazılımın değişikliklerine uyum sağlar ve manuel güncelleme sürecinde yapılabilecek hataları önler (Feldt, Torkar, & Orekhov, 2021).

Özellikle büyük ve karmaşık projelerde, dokümantasyonun kalitesi, yazılımın sürdürülebilirliği ve uzun ömürlülüğü açısından büyük bir öneme sahiptir. AI, bu tür projelerde dokümantasyonun doğruluğunu ve güncelliğini sağlarken, aynı zamanda kodla ilgili potansiyel sorunları ve hataları da tespit edebilir. Bu, yazılımın genel kalitesini artırırken, projelerde yapılan hata oranını da önemli ölçüde düşürür (Vasilescu, Filkov & Serebrenik, 2017). AI'nın yazılım geliştirme süreçlerine entegrasyonu, yazılım mühendislerinin iş yükünü hafifletirken, dokümantasyon kalitesini artırır ve hataların önlenmesine önemli katkılarda bulunur. Bu teknolojiler, yazılım projelerinin daha verimli, doğru ve sürdürülebilir olmasını sağlayarak, yazılım mühendisliğinde devrim niteliğinde yenilikler sunmaktadır.

İTERAKTİF VE DİNAMİK DOKÜMANTASYON

İnteraktif ve dinamik dokümantasyon çözümleri, kullanıcıların ihtiyaçlarına hızlı ve etkili bir şekilde yanıt vererek yazılım kullanımını kolaylaştırır. Yapay zekâ ile entegre dokümantasyon sistemleri ise, dokümantasyonun sürekli güncellenmesini ve optimize edilmesini sağlayarak, kullanıcı deneyimini ve dokümantasyonun kalitesini artırır. Bu başlık altında interaktif ve dinamik dokümantasyon çözümleri hakkında yararlı bilgiler verilecektir.

Kullanıcı İhtiyaçlarına Yönelik İnteraktif Dokümantasyon Çözümleri

Yazılım dokümantasyonu, kullanıcıların bir yazılımı nasıl kullanacaklarını ve yazılımın nasıl çalıştığını anlamaları için hayati öneme sahiptir. Geleneksel dokümantasyon genellikle statik ve okunması zor olabilir, bu da kullanıcıların ihtiyaç duydukları bilgilere hızlıca ulaşmalarını engeller. İnteraktif dokümantasyon çözümleri, bu sorunu aşmak için kullanıcıya dinamik ve kişiselleştirilmiş bir deneyim sunar. Bu çözümler, kullanıcıların ihtiyaçlarına göre özelleştirilmiş rehberler, adım adım talimatlar ve gerçek zamanlı geri bildirimler sağlayarak dokümantasyonun daha etkili ve kullanışlı olmasını sağlar (Milewski, 2019).

İnteraktif dokümantasyon sistemleri, kullanıcıların etkileşimde bulunabileceği, sorular sorabileceği ve anında geri bildirim alabileceği özellikler sunar. Örneğin, bir yazılım geliştirme ortamında, bir geliştirici kod yazarken belirli bir fonksiyon hakkında bilgi almak istediğinde, interaktif dokümantasyon anında bu bilgiyi sunabilir. Bu tür sistemler, yazılım kullanımını hızlandırırken, kullanıcıların eğitim sürelerini de kısaltır (Greene & Smith, 2021). Ayrıca, interaktif dokümantasyon çözümleri, kullanıcıların deneyim seviyelerine göre de özelleştirilebilir. Bir başlangıç seviyesindeki kullanıcı, daha temel ve adım adım rehberlere ihtiyaç duyarken, ileri düzey bir kullanıcı daha derinlemesine teknik bilgilere erişmek isteyebilir. İnteraktif sistemler, kullanıcıların bu ihtiyaçlarına göre içeriği dinamik olarak düzenleyebilir ve sunabilir (Ren et al., 2020).

Yapay Zekâ ile Entegre Dokümantasyon Sistemlerinin Avantajları

Yapay zekâ (AI) teknolojileri, dokümantasyon süreçlerini daha verimli ve kullanıcı odaklı hale getirmek için çeşitli avantajlar sunar. AI ile entegre dokümantasyon sistemleri, kullanıcıların ihtiyaçlarını daha iyi anlayarak, onlara en uygun bilgileri sunar. Bu sistemler, kullanıcıların yazılımı nasıl kullandıklarına dair verileri analiz ederek, onların en çok ihtiyaç duyduğu bilgilere öncelik verir (Allamanis, Barr, Bird, & Sutton, 2018).

AI tabanlı dokümantasyon sistemleri, doğal dil işleme (NLP) tekniklerini kullanarak, kullanıcıların sorularını anında cevaplayabilir ve onlara ilgili dokümanları sunabilir. Bu, kullanıcıların bilgiye erişim sürelerini önemli ölçüde kısaltır ve dokümantasyonun etkinliğini artırır. Ayrıca AI, dokümantasyonun sürekli olarak güncellenmesini ve kullanıcılardan gelen geri bildirimlerle optimize edilmesini sağlar. Bu dokümantasyonun her zaman en güncel ve doğru bilgileri içermesini garanti eder (Gao et al., 2020).

AI ile entegre sistemler ayrıca, kullanıcı davranışlarını analiz ederek, hangi bilgilerin daha çok arandığını, hangi bölümlerin daha fazla okunup uygulandığını tespit edebilir. Bu analizler, dokümantasyonun daha kullanıcı dostu hale getirilmesi ve gereksiz bilgilerin ayıklanması için değerli geri bildirimler sağlar. Böylece, kullanıcılar için daha özelleştirilmiş ve verimli bir dokümantasyon deneyimi sunulur (Feldt, Torkar, & Orekhov, 2021).

YAPAY ZEKÂ VE DOKÜMANTASYONUN GELECEĞİ

Bu başlık altında yapay zekânın dokümantasyon hazırlama süreçlerindeki geleceği ile geliştiriciler ve son kullanıcılar açısından ne gibi yararlar sağlayacağı konusu ele alınacaktır.

Yapay Zekânın Dokümantasyon Hazırlama Süreçlerindeki Geleceği

Yapay zekâ (AI) teknolojilerinin yazılım dokümantasyon süreçlerine entegrasyonu, bugünden geleceğe doğru hızla gelişen bir alan olarak karşımıza çıkmaktadır. Günümüzde, AI'nın sağladığı en önemli avantajlardan biri, büyük miktarda veriyle çalışarak bu verilerden anlamlı bilgi çıkarmasıdır. Dokümantasyon süreçlerinde, bu özellik, karmaşık yazılım sistemlerinin anlaşılmasını ve belgelenmesini kolaylaştırmaktadır (Allamanis, Barr, Bird, & Sutton, 2018).

Gelecekte, AI'nın dokümantasyon süreçlerinde daha proaktif bir rol oynaması beklenmektedir. Örneğin, AI tabanlı sistemler, yazılım geliştirme sürecinin başlangıcından itibaren yazılımın her adımını izleyerek, kodun nasıl çalıştığını anlamak ve bunu belgelerken proaktif öneriler sunmak gibi yeteneklere sahip olacaktır. Bu, dokümantasyonun daha kapsamlı ve doğru olmasını sağlayacak, aynı zamanda geliştiricilerin iş yükünü azaltacaktır (Tufano et al., 2019). Ayrıca, AI'nın doğal dil işleme (NLP) yeteneklerinin gelişmesiyle, kullanıcıların dokümantasyon ile daha etkileşimli bir şekilde çalışmalarını mümkün olacaktır. Kullanıcılar, belirli bir konuda bilgi ararken, AI tabanlı sistemler onlara ilgili bölümleri sunmakla kalmayacak, aynı zamanda bu bilgiyi kullanıcının seviyesine göre özelleştirip sunabilecektir. Bu, dokümantasyonun hem daha erişilebilir hem de kullanıcı dostu olmasını sağlayacaktır (Greene & Smith, 2021).

Geliştiriciler ve Son Kullanıcılar için AI Destekli Dokümantasyonun Faydaları

AI destekli dokümantasyon sistemlerinin sağladığı en büyük avantajlardan biri, geliştiricilerin ve son kullanıcıların daha verimli çalışmasını sağlamasıdır. Geliştiriciler için AI, kod yazarken veya hata ayıklarken ihtiyaç duydukları belgelere anında erişim sağlayabilir. Bu, geliştirme sürecinde önemli bir zaman tasarrufu sağlarken, aynı zamanda hataların daha hızlı bir şekilde tespit edilmesini ve düzeltilmesini sağlar (Gao et al., 2020).

AI tabanlı dokümantasyon sistemleri, aynı zamanda dokümantasyonun güncel kalmasını da sağlar. Geleneksel dokümantasyon yöntemlerinde, yazılımın güncellenmesi durumunda dokümantasyonun manuel olarak yeniden düzenlenmesi gerekebilir. Bu süreç, zaman alıcı ve hata yapmaya açıktır. Ancak, AI destekli sistemler, yazılımın her değişikliğini izleyerek dokümantasyonu otomatik olarak güncelleyebilir. Bu hem geliştiriciler hem de son kullanıcılar için dokümantasyonun her zaman doğru ve güncel olmasını garanti eder (Feldt, Torkar, & Orekhov, 2021).

Son kullanıcılar açısından, AI destekli dokümantasyon, daha kişiselleştirilmiş ve etkileşimli bir deneyim sunar. Örneğin, bir yazılımı kullanırken sorun yaşayan bir kullanıcı, AI destekli bir dokümantasyon sistemine sorunu açıklayabilir ve anında özelleştirilmiş bir çözüm alabilir. Bu, kullanıcıların yazılımı daha etkin bir şekilde

kullanmalarını sağlar ve müşteri memnuniyetini artırır (Vasilescu, Filkov, & Serebrenik, 2017).

AI'nın dokümantasyon süreçlerine entegrasyonu, yazılım geliştirme ve kullanımında devrim niteliğinde yenilikler sunmaktadır. Geliştiriciler için daha verimli ve hatasız bir çalışma ortamı sağlarken, son kullanıcılar için daha erişilebilir ve kullanıcı dostu bir deneyim sunar. AI'nın bu alandaki potansiyeli, gelecekte yazılım dokümantasyonunun nasıl yapılacağına dair yeni standartlar belirleyecek nitelikte olup, yazılım endüstrisinde önemli bir rol oynamaya devam edecektir.

SONUÇ

Yapay zekâ (AI) teknolojilerinin dokümantasyon süreçlerine entegrasyonu, yazılım geliştirme dünyasında yeni bir dönemi başlatmaktadır. Bu teknolojinin sunduğu olanaklar, yazılım dokümantasyonunu daha dinamik, etkileşimli ve kullanıcı dostu hale getirmektedir. Geleneksel dokümantasyon yöntemleri, genellikle statik ve zaman alıcıdır, bu da dokümanların hızla güncelliğini yitirmesine ve kullanıcılar için erişilmesi zor bilgilere dönüşmesine neden olur. Ancak AI, bu süreci kökten değiştirerek, dokümantasyonun her zaman güncel, doğru ve kullanıcı ihtiyaçlarına göre özelleştirilmiş olmasını sağlar. Özellikle doğal dil işleme (NLP) tekniklerinin kullanımı, dokümantasyonun hem hazırlanmasında hem de kullanıcıya sunulmasında büyük bir devrim yaratmaktadır. AI, büyük veri setlerini analiz ederek, kullanıcıların dokümantasyona erişimlerini daha etkili hale getirir. Bu durum, geliştiricilerin iş yükünü hafifletirken, kullanıcıların da yazılımları daha verimli bir şekilde kullanmalarını sağlar. AI'nın bu alandaki en büyük katkılarından biri, dokümantasyonun otomatik olarak güncellenmesi ve yönetilmesi sürecidir. Yazılımda yapılan her değişiklik, AI destekli sistemler tarafından anında dokümantasyona yansıtılarak, bilgilerin her zaman güncel kalması sağlanır.

AI tabanlı kod yorumlama ve açıklama araçları, geliştiricilerin hataları daha hızlı tespit etmelerine ve çözmelerine yardımcı olur. Bu, yazılım geliştirme süreçlerinde verimliliği artırırken, dokümantasyon kalitesinin de yükselmesini sağlar. Ayrıca, AI'nın sağladığı bir diğer avantaj, interaktif dokümantasyon çözümlerinin geliştirilebilmesidir. Bu sistemler, kullanıcıların belirli sorularına anında cevap verebilen ve onların deneyim seviyelerine göre rehberlik sunan özellikler içerir. Böylece, dokümantasyon süreci kullanıcı merkezli bir yapıya kavuşur ve yazılımın daha kolay öğrenilmesi sağlanır.

AI destekli dokümantasyon sistemlerinin gelecekte daha da gelişmesi beklenmektedir. Bu sistemlerin, geliştiricilerin ve son kullanıcıların ihtiyaçlarına daha fazla odaklanarak, yazılım endüstrisinin standart bir parçası haline gelmesi kaçınılmazdır. Geliştiriciler açısından, AI'nın sağladığı otomatikleştirme ve optimizasyon özellikleri, iş yükünü hafifletmekte ve hata riskini minimize

etmektedir. Son kullanıcılar ise, AI sayesinde daha kişiselleştirilmiş ve etkileşimli bir dokümantasyon deneyimi yaşayarak, yazılımları daha etkin bir şekilde kullanma imkanına sahip olmaktadır.

Sonuç olarak AI'nın dokümantasyon süreçlerine entegrasyonu, yazılım geliştirme ve kullanımında köklü değişiklikler yaratmaktadır. Hem geliştiriciler hem de son kullanıcılar için büyük avantajlar sunan bu teknolojinin, gelecekte yazılım endüstrisinin ayrılmaz bir parçası haline gelmesi beklenmektedir. AI'nın bu alandaki potansiyeli, dokümantasyon süreçlerini daha verimli, etkili ve kullanıcı dostu hale getirmekte, yazılım endüstrisinin geleceğini şekillendirmektedir.

KAYNAKLAR

- Allamanis, M., Barr, E. T., Bird, C., & Sutton, C. (2018). A survey of machine learning for big code and naturalness. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 51(4), 1-37.
- Dagenais, B., & Robillard, M. P. (2010). Recommending adaptive changes for framework evolution. *Proceedings of the 32nd ACM/IEEE International Conference on Software Engineering*, 26-36.
- Feldt, R., Torkar, R., & Orekhov, V. (2021). Machine learning-based test generation and the black-box problem in software testing. *Software Quality Journal*, 29(1), 21-48.
- Gao, Z., Keivanloo, I., & Zou, Y. (2020). Code comment generation: A neural machine translation approach. *IEEE Transactions on Software Engineering*, 46(3), 346-360.
- Greene, J., & Smith, R. (2021). Enhancing user experience with interactive documentation. *Journal of Documentation*, 77(2), 456-474.
- Liao, Q. V., Gruen, D. M., & Miller, S. (2020). Questioning the AI: Informing design practices for explainable AI user experiences. *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 1-15.
- Milewski, C. (2019). The evolution of interactive technical documentation. *Technical Communication*, 66(3), 307-319.
- Rajlich, V., & Bennett, K. H. (2000). A staged model for the software life cycle. *Computer*, 33(7), 66-71.
- Ren, Z., Li, X., & Li, Y. (2020). Personalized documentation generation for software systems. *IEEE Transactions on Software Engineering*, 47(4), 893-906.
- Senn, J. A. (2019). Artificial intelligence and its impact on software engineering. *Journal of Systems and Software*, 156, 110420.
- Sharma, P., Ghosh, S., & Goswami, S. (2019). Natural language processing for the automation of software documentation. *Proceedings of the 2019 IEEE/ACM 41st International Conference on Software Engineering: Companion Proceedings (ICSE-Companion)*, 181-182.
- Tufano, M., Watson, C., Bavota, G., Di Penta, M., Poshyvanyk, D., & De Lucia, A. (2019). An empirical investigation into learning patterns of API documentation using large-scale code corpora. *Empirical Software Engineering*, 24(3), 1665-1703.
- Uddin, G., & Robillard, M. P. (2015). How API documentation fails. *IEEE Software*, 32(4), 68-75.
- Vasilescu, B., Filkov, V., & Serebrenik, A. (2017). Stack Overflow and GitHub: Associations between software development and crowdsourced knowledge. *Proceedings of the 2017 IEEE/ACM 39th International Conference on Software Engineering*, 476-486.

5. Bölüm

Bazaltlar ve Endüstriyel Kullanım Alanları

Gizem Arslan¹

¹ Arş. Gör. Dr., Fırat Üniversitesi Mühendisli Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü
Mail: g.arslan@firat.edu.tr, ORCID No: 0000-0002-8727-7509

Özet

Yerkabuğu içerisinde asılı halde kayaç parçaları ile erimiş halde gaz içeren hareketli kayaç malzemesi olan magmanın katılaşması sonucu magmatik kayaçlar oluşmaktadır. Bu kayaçlar oluşum derinlikleri, içerdikleri mineral oranları, kimyasal bileşimleri, renk indisi ve dokusal özellikleriyle sınıflandırılmışlardır. Mineralojik sınıflamada magmatik kayaçlar oluşum derinliklerine göre derinlik-yarı derinlik-yüzey kayaçları olmak üzere sınıflandırılmışlardır. Bazaltlar esas olarak plajiyoklas içeren yüzey kayacıdır. Yüksek yoğunluğa sahip bazaltlar ince taneli ve genellikle siyah-koyu gri renklerde olup hem bilimsel hem de endüstriyel açıdan büyük öneme sahiptir.

Anahtar kelimeler: Magma, kayaç, bazalt, yerkabuğu, plajiyoklas

1. Giriş

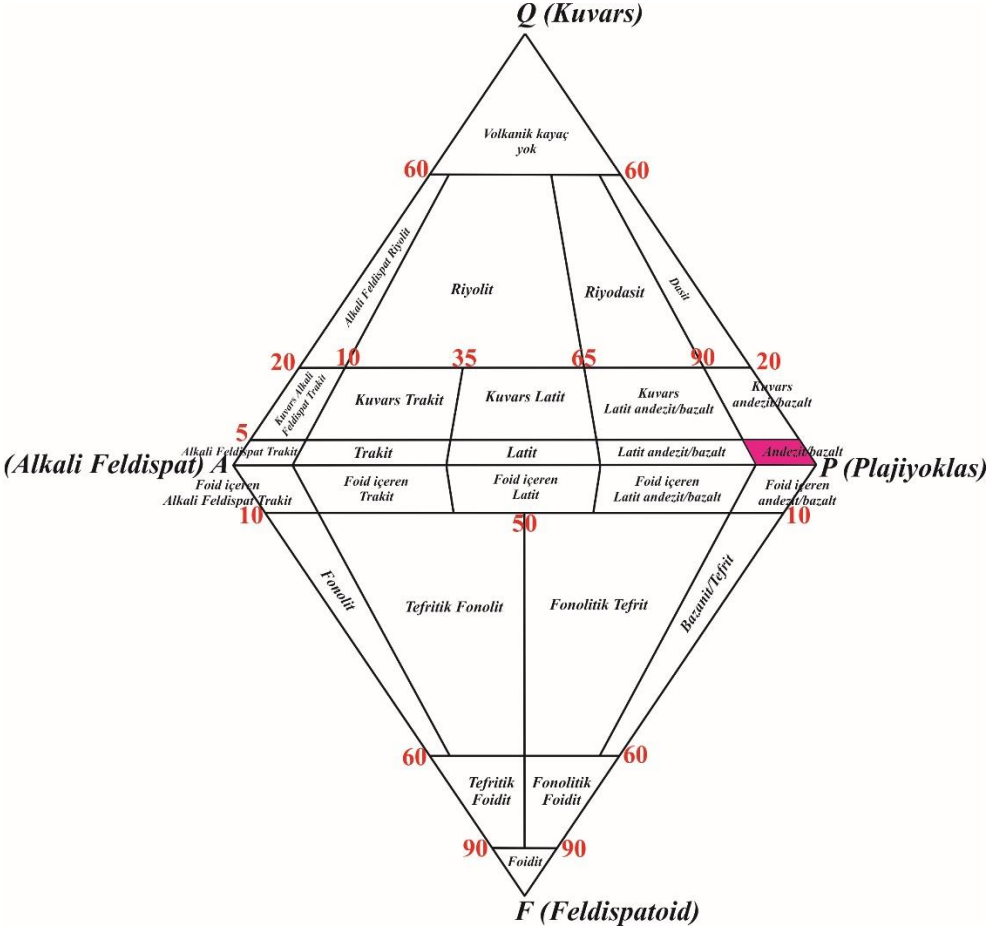
Bazaltlar, %45-53 SiO₂ içeriğine sahip ince taneli magmatik bir kayadır (Şekil 1.2). Plajiyoklas ve piroksenlerden oluşmuşlardır. İnce taneli olan bazaltlar farklı dokular sergilemekte olup bazaltlarda gözlenen dokular ve belli başlı özellikleri tablo 1.1’de verilmiştir:

Tablo 1.1: Bazaltlarda gözlenen dokular ve özellikleri
(Bingöl ve Beyarslan, 2005)

Doku Adı	Plajiyoklas	Piroksen	Matriks	Karşılaşırma	Eş Anlamısı
Ofitik	Öz-yanör şekilli, tabular latalar halinde Ender olarak iskelet halinde, piroksen kristalleri ile çevrilmiştir. Kristalleri piroksenden daha kıstadır.	Yanör şekilli, şekilsiz, poikilitik, nadiren özçekilli, plajiyoklastan büyük kristaller halinde olup onları içermektedir.	Tamamen kristalin, çok az camı kalıntı olabilir veya hiç yoktur. Olivin, opak mineraller olabilir.	Poikilitik doku çehidi olup, sadece iyi gelişmiş plajiyoklas içermesi ile ayrılır.	Poikilitik Diabazik Doleritik
Subofitik	Öz-yanör şekilli, latalar halinde uzamış kristaller iskelet halinde olabilirler, piroksen kristalleri ile kısmen çevrilmişlerdir. Kristalleri çoğunlukla piroksenden daha uzundur.	Yanör şekilli, şekilsiz, bazen özçekilli, plajiyoklastan büyük kristaller halinde olup kısmen onları içermektedir.	Tamamen veya hemen hemen kristalin, bazen camı malzeme bulunabilir. Olivin, opak mineraller olabilir.	Ofitik dokudan, küçük, çoğunlukla daha iyi oluşmuş piroksen ve iskelet halindeki plajiyoklastarla ayrılır.	Doleritik
İntergranüler	Öz-yanör şekilli, latalar halinde uzamış kristaller iskelet halinde olabilirler.	Şekilsiz, bazen özçekilli taneler halinde olup plajiyoklas iskeletlerinin arasını doldurur.	Taneli olivin, opak mineraller olabilir.	İnterseral dokudan matrisin olmayışı, ofitik dokudan ise taneli, interseral poikilitik piroksen ile ayrılır.	Subdoleritik Diabazik
İnterseral	Öz-yanör şekilli, latalar halinde veya iğnemi halde çoğunlukla iskelet halinde subinsal veya subparalel şekilde çatılar oluşturur.	Piroksenler çoğunlukla kristalleşmemiş ve ince sferulitler halinde görülür. Taneli kristaller küçük ve az miktardadır.	Cam veya palagonit veya ince taneli alterasyon ürünleri görülür. Yalpaze şeklinde piroksen veya taneli piroksenler sıkça görülür.	İntergranüler dokudan interseral cam veya diğer ince taneli felsik malzemenin varlığı ile hiyalofitik veya hiyalopilitik dokulardan ise plajiyoklas çatısının varlığı ile ayrılır.	Vitrofir Perfiritik
Sferulitik (Yalpaze)	Öz-yanör şekilli, uzamış, iğnemi halde genellikle iskelet halinde insal veya subinsal kümeler halinde bulunur. Yalpaze biçimlidir ve piroksen sferulitleri ile birlikte büyümüşlerdir.	Öz ve yanör şekilli, uzamış, iğnemi, çoğunlukla iskelet halinde, sferulitik, ince taneli kristaller halinde.	Cam veya palagonit veya ince taneli alterasyon ürünleri görülür. Iskelet veya kaş şeklinde olivin görülebilir.	Özellikle ince taneli olduğu zaman yalpaze şeklinde sferulitik piroksenlerin baskın olması ile ayrılır. Plajiyoklastalar genellikle piroksenlerle birlikte büyümüşlerdir.	Vitrofir Variolitik İnsal Faiküler
Hiyafotik	Öz-yanör şekilli, latalar uzamış iğnemi kristaller, çoğunlukla dokunak oluşumunayp subinsal veya subparalel şekilde bulunurlar.	Az miktarda mikrolitler halinde kristalleşmiştir. Yalpaze veya taneli kristaller halinde bulunurlar.	Cam, palagonit veya ince taneli alterasyon ürünleri görülür. Piroksenler genellikle matrisin bir kısmı olarak kabul edilir.	İnterseral dokudan camı malzemenin azlığı ile ayrılır.	Vitrofirik Porfirik
Hiyalopilitik	Öz yanör şekilli mikrolitler halinde olabilir. Gelişi güzel yönde dizilmişlerdir.	Çok az mikrolitler halinde, sferulit veya taneli kristaller halinde.	Cam, palagonit veya ince taneli alterasyon ürünleri görülür. Piroksenler matrisin bir kısmı olarak kabul edilir.	Hiyalofitik dokudan küçük plajiyoklas mikrolitleri ile ve matrisin artması ile ayrılır. Plajiyoklastaların oluştuğu iskeletin olmayışı ile de interseral dokudan ayrılır.	Vitroporfirik Mikrolitik
Pitotaksitik	Öz yanör şekilli mikrolitler iskelet halinde olabilir. Akıntı ile paralel veya subparalel olarak uzamışlardır.	Küçük taneler, mikrolitler halinde.	Mikro veya kript kristalin veya çok küçük taneli piroksenler, opak mineraller, apatit olabilir.	Hiyalofitiktan plajiyoklastaların azlığı, matrisin olmayışı ile ayrılır.	Mikrolitik

1.1. Bazaltların mineralojik ve petrografik özellikleri

Esas bileşenlerini labrador bileşimindeki plajiyoklasların (bazı bazalt türlerinde bitovnit ve ender olarak anortit) oluşturduğu bazaltlar ayrıca klinopiroksen, ortopiroksen ve olivin içerebilmektedir. Gabronun yüzey kayaçlarıdır (Şekil 1.1).

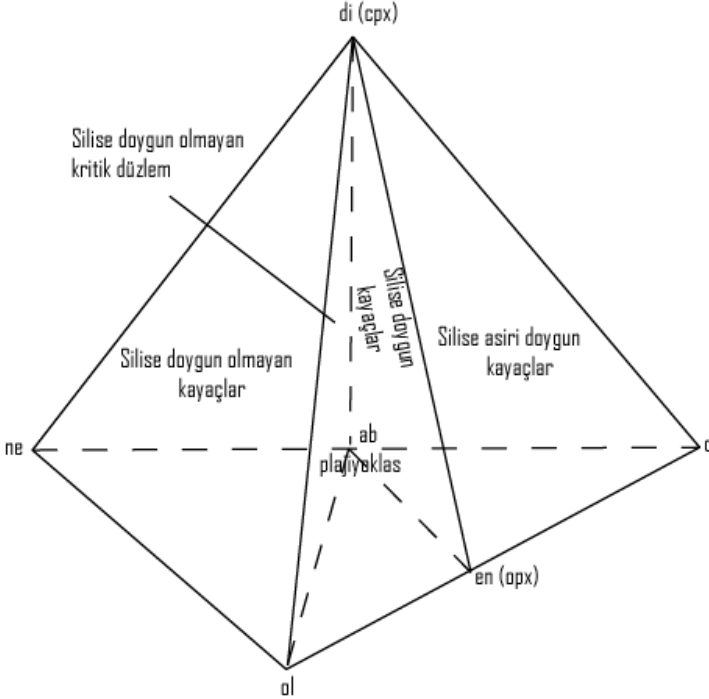


Şekil 1.1: Bazaltların QAPF diyagramındaki yeri (Streckeisen, 1976)



Şekil 1.2: Bazalt el örnekleri

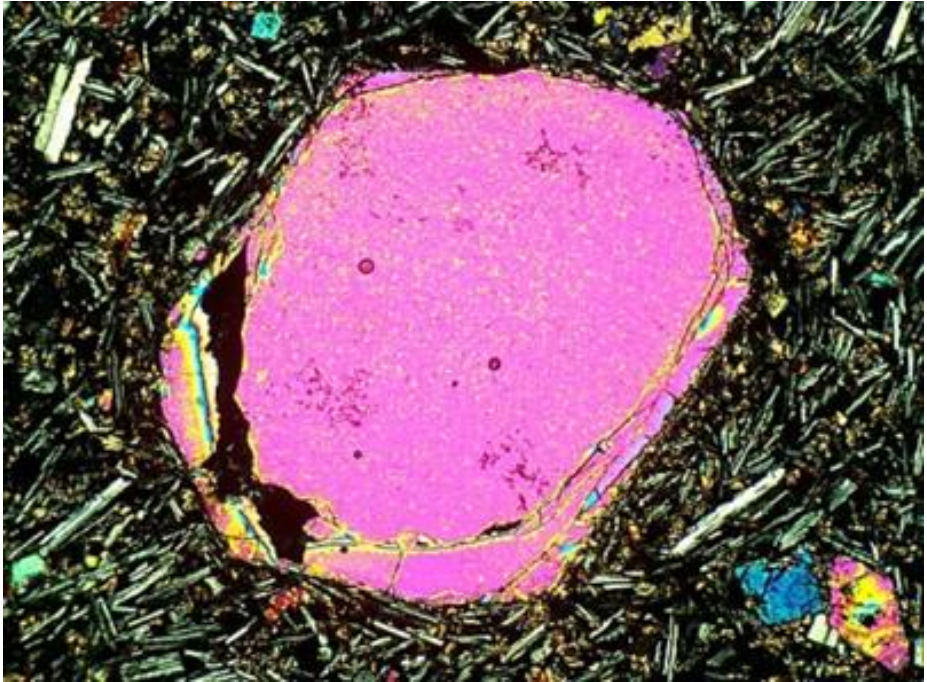
Bazalt tetraederinde (Yoder ve Tilley, 1962) normatif ve modal bileşenler gösterilirse olivin ve nefelin kuvars ile birlikte bulunmadığı görülmektedir. Ancak normatif albit ve diyopsit tüm bileşenlerle bulunabilmektedir. Yoder ve Tilley (1962) bazalt tetraederine bakıldığında diyopsit-albit-enstatit düzleminin kuvars tarafına düşen bölümündeki kayaçlar silise aşırı doygun olduğu için bu düzlem silise doygun düzlem olarak adlandırılır. Diyopsit-albit-forsterit düzleminin nefelin tarafında kalan kritik düzlem ise silise doygun olmayan bazalt düzlemi olarak adlandırılır (Şekil 1.3).



Şekil 1.3: Bazalt tetraederi (Yoder ve Tilley, 1962)

Yoder ve Tilley (1962), bazaltları beş grup halinde sınıflandırmışlardır:

- **Toleyitler:** Normatif kuvars içermektedir.
- **Hiperstenli Bazalt:** Normatif enstatit, normatif kuvars veya forsterit yok.
- **Olivinli Toleyit:** Normatif enstatit+forsterit, kuvars ve nefelin yok.
- **Olivinli Bazalt:** Normatif forsterit (Diyopsit-albit-forsterit düzlemi).
- **Alkali Bazalt:** Normatif nefelin.



Şekil 1.4: Çift nikelde olivinli bazalt görünümü

1.2. Bazaltların bulunuşu

Yeryüzünde oldukça yaygın olarak bulunan bazaltlar okyanus ortası sırtları, okyanus adaları ve karasal plato alanlarında gözlenmektedirler.

1.2.1. Okyanus Ortası Sırt Bazaltları (MORB)

Okyanus kabuğunun malzemesini mafik kayaçların büyük bir kısmı oluşturmaktadır. Birbirinden uzaklaşan levha sınırları boyunca yükselen magmanın katılarak yavaş yavaş bu sınırlardan uzaklaşmasıyla bazaltlar oluşmaktadır. Okyanus tabanlarından alınan örnekler üzerinde yapılan incelemeler neticesinde burada bulunan bazaltlar “abisal toleyit, okyanusal toleyit” gibi farklı adlarla adlandırılmışlardır. 1980’lerden sonra ise bu bazaltlar için genel olarak “**Okyanus Ortası Sırtı Bazaltları (MORB)**” terimi

kullanılmaya başlanmıştır. Okyanus ortası sırtı bazaltlar (MORB) diğer bazaltlarla karşılaştırıldıklarında bunların Ba, P, K, Zr, Rb, Sr, U, Th ve REE (Nadir Toprak Elementler) bakımından fakir oldukları görülmektedir (Bingöl ve Beyarslan, 2005).

1.2.2. Okyanus Adası Bazaltları (OIB)

Okyanus kabuğu üzerinde, sırt eksenlerinden uzak bölgelerde, gelişmiş birçok ada bulunmaktadır. Bu adalara en iyi örnek İzlanda ve Hawaii adalarıdır. Orta Atlantik Sırtı üzerinde bulunan İzlanda adası volkanik, plütonik ve piroklastik kayalardan oluşmaktadır. İzlanda bazaltları Okyanus Ortası Sırtı Bazaltı (MORB) ile karşılaştırıldığında İzlanda bazaltlarının Mg ve Al oranlarının daha düşük olduğu; Fe, Ti, K ve P bakımından ise daha zengin olduğu görülmektedir. Hawaii Adaları bazaltlarının levha sınırları ile ilişkisi yoktur. Bu tür adalardaki volkanik kayaları veren magmaların oluşumu manto içerisinde bulunan kor noktalara bağlanmaktadır (Bingöl ve Beyarslan, 2005).

1.2.3. Kıtasal plato bazaltları

Kıtasal Plato Bazaltları Güney Amerika, Afrika, Antartika, Hindistan gibi bölgelerde geniş alanlar kaplamakta olup, bu bazaltlar genellikle normatif olivin+hipersten veya kuvars içerirler. Bazı bölgelerde ise normatif nefelinli bazaltlar da görülmektedir. Swanson ve Wright (1981)'e göre bu bazaltları oluşturan magma bileşiminin mantodaki heterojen ana kayaların kısmi ergimesi kontrol etmektedir. Bu şekilde bileşimi kontrol edilen magma, derinlerde depolanmayı takip eden hızlı taşınma ile küçük bileşimsel değişikliklere uğramaktadır (Bingöl ve Beyarslan, 2005).

1.3. Bazaltların endüstriyel kullanım alanları

Bazik yüzey kayalarından olan bazaltlar, oldukça sert ve dayanıklıdır. Bazaltların endüstriyel kullanım alanları aşağıda verilmiştir:

- Mermer (siyah granit), küp taş ve parke, dekoratif kaplama (Uz vd., 2001; Kulaksız, 2007; Yaşar ve Erdoğan, 2001; Yüzer, 2008; Koçak, 2011; Yüzer vd., 2016)
- Demiryolu hatlarının yapımında balast malzemesi olarak (Koralay vd., 2014)
- Betonda kırma taş (agrega) olarak (Çağlayan vd., 1999; Uz, 1999; Öztürk vd., 2003; Karadağ, 2008; Koçak, 2011; Kılıç vd., 2015; Kahraman ve Kılıç, 2016; Taşdemir, 2016; TS EN 206, 2014; Yıldız vd., 2022)
- Binalarda yapı taşı olarak (Korkanç ve Tuğrul, 2003)
- Otoyollarda asfalt malzemesi olarak (Aksoy, 1999; Gökalp vd., 2018)

- Bazaltik cürufların (gözenekli bazaltların) kaba ve ince sıvada kullanımları (Kulaksız, 2017)
- Çatılarda ısı izolasyonunda doğal halde bazaltik cüruflar (Kulaksız, 2017)
- Hafif beton elemanlarının üretiminde (Kulaksız, 2017)
- Kaya yünü üretiminde (Kuşoğlu vd., 2012)
- Çimento sektöründe altere bazaltların tras olarak kullanımları (Kulaksız, 2017)

Sonuçlar

Bazaltlar, volkanik faaliyetlerin bir göstergesi olarak dünya üzerindeki en yaygın volkanik kayalardan biridir. İnce taneli yapısı, düşük silis içeriği ve yüksek yoğunluğa sahip bazaltlar oldukça sert ve dayanıklıdır. Bilimsel ve endüstriyel anlamda büyük öneme sahiptir. İnşaat ve altyapıdan, metalürji ve kimya endüstrisine kadar pek çok sektörde yaygın bir şekilde kullanılan bazaltın endüstriyel değerinin gelecekte de artarak devam etmesi beklenmektedir.

Kaynaklar

- Aksoy, C.O., 1999. Kırmataş üretim yöntemlerinin ekonomik analizi. 3. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu Bildiriler Kitabı, 14-15 Ekim, İzmir, s.97-103.
- Bingöl A.F. ve Beyarslan, M., 2005. Magmatik Petrografi ve Petroloji Ders Notları (Yayımlanmamış).
- Çağlayan, M., Haberveren, S., İpekoğlu, B. ve Kurşun, İ., 1999. Beton yapımında kullanılan agregaların özellikleri ve örnek bir kuruluş. "İSTON". 2. Ulusal Kırmataş Sempozyumu, s.69-79.
- Gökalp, İ., Uz, V.E., Saltan, M. ve Tutumluer, E., 2018. Technical and environmental evaluation of metallurgical slags as aggregate for sustainable pavement layer applications. *Transportation Geotechnics*, 14, 61-69.
- Karadağ, A., 2008. Farklı kökenli agregalar içeren yüksek mukavemetli betonların elastik özelliklerinin incelenmesi. İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, (Yıldırım, H.- Tez Danışmanı).
- Kahraman, E. ve Kılıç, A.M., 2016. Agregada madenciliğinin hazır beton üretimindeki yeri. 8. Uluslararası Kırmataş Sempozyumu, 13-14 Ekim 2016, s. 324-329.
- Kılıç, A.M., Sakatoğlu S., Kahraman, E. ve Yılmaz, M., 2015. Adana ili taş (kalker) işletmelerinde üretilen agreganın il açısından önemi. TMMOB, Adana Kent Sorunları Sempozyumu-III, Adana, Türkiye, 22-23 Mayıs 2015, ss.561-574.
- Kulaksız, S., 2007. Aksaray-Nevşehir-Karaman Bölgesi bazaltik cürüfların doğal yalıtım malzemesi olarak değerlendirilmesi, 6. Uluslararası Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, TMMOB Maden Müh. Odası Bildiriler Kitabı.
- Koçak, E., 2011. Kayseri bazaltının yapı taşı olarak kullanım olanaklarının araştırılması. Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, s.76.
- Koralay, T., Çobanoğlu, İ. ve Demir, M., 2014. Ofiyolitler içerisindeki gabro dayklarının balast malzemesi olarak kullanılabilirliği:(Bozkurt-Denizli) örneği. *K.S.U Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 17 (2), 32-48.
- Korkanç, M. ve Tuğrul, A., 2003. Niğde yöresi bazaltlarının beton agregası olarak kullanılabilirliği. 3. Ulusal Kırmataş Sempozyumu (3-4 Aralık 2003), İstanbul, s.99-106.
- Kuşoğlu, R., Kabakcı, B., Kadioğlu, Y.K., 2012. Kaya yünü özelliği taşıyan bazaltların jeokimyasal özelliği ve Türkiye'den örnekler. Uluslararası Katılımlı 5. Jeokimya Sempozyumu, 23-25 Mayıs, s.209-210, Denizli.

- Öztürk, C.A., Nasuf, E., Fişne, A. ve Erkan, M., 2003. Türkiye ve dünyada agrega organizasyonları ve işlevleri. III. Ulusal Kırmataş Sempozyumu (3-4 Aralık 2003). İstanbul, s.317-325.
- Streckeisen, A.L., 1976. Classification and Nomenclature of Igneous Rocks. N. Jahrb. Miner. Abh., 107, 144-240.
- Swanson, D.A. ve Wright, T.L., 1981. Guide to geologic field trip between Lewiston, Idaho and Kimberley, Oregon, emphasizing the Columbia River Basalt Group. U.S. Geol. Soc. Circ. 838, 14 p.
- Taşdemir, C., 2016. Agrega tür ve boyutunun betonun dayanımına ve donma-çözülme direncine etkileri. Agrega Bülteni, 3, 6-12.
- TS EN 206, 2014. Beton - Özellik, Performans, İmalât ve Uygunluk. TSE, Ankara.
- Uz, B., 1999. Bazaltların Kırmataş Yönünden Değerlendirilmesi Trakya-Tekirdağ Bölgesi Bazaltları Örneği. 2. Ulusal Kırmataş Sempozyumu, İstanbul, s.1-12.
- Uz, B., Esenli, V., Yavuz, O., Manay, H. ve Bacak, G., 2001. Sert Mermer Grubuna Bir Örnek; Karacadağ (Diyarbakır) Bazaltlarının ‘Mermer’ Açısından İncelenmesi. Türkiye III. Mermer Sempozyumu (MERSEM 2001) Bildiri Kitabı, Afyon, s. 9-15.
- Yaşar, E. ve Erdoğan Y., 2001. Toprakkale bazaltının doğal taş endüstrisindeki yeri, 4. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, s. 87-96.
- Yıldız, T.D., Gültekin, A.H. ve Özdamar, Ş., 2022. Gerede-Kavacık Bölgesi bazaltlarının endüstriyel kullanımı açısından uygunluğunun belirlenmesi. Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 10 (1), 7-27. <https://doi.org/10.21923/jesd.943867>
- Yoder, H.S. ve Tilley, C.E., 1962. Origin of Basalt Magmas: An Experimental Study of Natural and Synthetic Rock Systems. Journal of Petrology, 3, 342-532.
- Yüzer, E., 2008. Doğal taş deyince. Granitaş, Taş Kültürü Yayını, ISBN: 978-9944-0619, 1.baskı, İstanbul.
- Yüzer, E., Güngör, Y. ve Aydoğan, S., 2016. Doğal taşın öyküsü. Kare Tasarım Yayıncılık, ISBN: 978-605-63410-2-1, 1. baskı, İstanbul.

6. Bölüm

Muğla Köyceğiz Mermerlerinin Beton Agregası Özellikleri ve Beton Olarak Kullanılabilirliği

Hakan ELÇİ¹
Ramazan HACIMUSTAFAOĞLU²

¹ Doç. Dr., Dokuz Eylül Üniversitesi, Torbalı Meslek Yüksekokulu, Geoteknik Programı İzmir.
hakan.elci@deu.edu.tr ORCID:0000-0003-2945-2548

² Öğr. Gör. Dr., Dokuz Eylül Üniversitesi, Torbalı Meslek Yüksekokulu,
Doğal Yapı Taşları Teknolojisi Programı, İzmir.
ramazan_@deu.edu.tr ORCID-0000-0002-2054-6559

1. Giriş.

Bu çalışmada, Muğla ili, Köyceğiz ilçesi Arıcılar Köyü sınırları içerisinde yer alan blok taş üretimi açısından verimsiz bir sahaya ait kayacın beton agregası olarak kullanılabilirliği litolojik özellikleri dikkate alınarak değerlendirilmesi yapılmıştır. Çalışma için blok taş sahasında yer alan kayaçtan toplamda 600-700 kg kadar 20x20x150 cm boyutlarında bloklar alınmıştır. Bu bloklardan hazırlanan agregaların, agrega özellikleri ve sertleşmiş beton özellikleri belirlenmiştir. Blok taş üretimi için uygun olmayan sahaya ait kayaçtan, alkali silika yönünden zararsız agregalar üretilebileceği ve bu agregalarında normal dayanımlı beton üretiminde kullanılabilirliği ortaya konulmuştur.

2. Materyal ve Yöntem

Çalışmada öncelikle mermerlerin litolojik özellikleri (petrografik tanımlama ve kimyasal analiz) belirlenmiştir. İkinci olarak da bu mermerlerden üretilen agregaların, malzeme özellikleri ve sonrada agregalardan üretilen betonların, beton basınç dayanımları ile birlikte alkali silis reaktifliği belirlenmiştir.

Sahaya ait kayacın petrografik özellikleri için sahanın genelini temsil edecek şekilde örnek alınmış ve her kayaç örneğinden üç adet ince kesit hazırlanmıştır. Hazırlanan ince kesitlere TS 10088 EN 932-3 (TSE, 2006)'a göre Olympus CX31 marka polarizan mikroskop ile farklı büyütme oranlarında petrografik analiz yapılmıştır. Petrografik analiz sonucunda kayacın mineral bileşenleri, mineral yüzdeleri dokusu, kristal boyutu, gözenek varlığı gibi özellikleri belirlenmiştir. Kayacın kimyasal özellikleri ise Endüktif Eşleşmiş Plazma Emisyon Spektrometresi (ICP-ES) metodu (ASTM C1301, 2014) kullanılarak ana oksitleri yüzdeleri belirlenmiştir.

Sahadan alınan bloklar balyoz yardımıyla 10 cm daha küçük boyuta indirgenmiştir (Şekil 1a ve 1b). Bu kayaç parçaları, laboratuvar tipi çeneli kırıcı ile kırılarak agrega haline getirilmiştir (Şekil 1c ve 1d). Üretilen agregalarının özellikleri (fiziksel, mekanik ve termal) TS 706 EN 12620 (TSE, 2009)'e göre belirlenmiştir. Hazırlanan agregalar laboratuvar ortamında TS EN 932-2 (TS, 1997)'e göre gerekli deney miktarı için azaltılmıştır. Bu agregalar kullanılarak dökülmüş betonun basınç dayanımı da TS EN 12390-3 (TSE, 2019c)'e göre belirlenmiştir. Agreganın alkali silika reaksiyonu ise ASTM C-1260-23, (ASTM, 2023)'e göre belirlenmiştir.

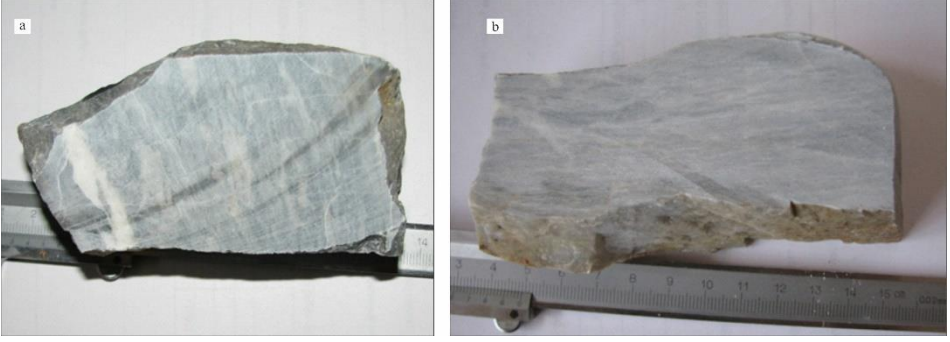


Şekil 1. Mermerlerin boyutlandırılması ve agrega numunelerinin hazırlanması

3. Deneysel Sonuçlar

3.1. Kayacın Mineralojik ve Petrografik Özellikleri

Kayaç gri beyaz renkli bir karbonat kaya görünümüne sahiptir. Petrografik analiz, 5x5x10 cm boyutlarında 3 parça el örneğinden hazırlanmış ikişer adet ince kesitten yapılmıştır (Şekil 2a ve 2b). Kayaç seyreltilmiş (%5) HCl asit çözeltisiyle, olağan bir karbonatlı kayaya benzer şekilde köpürerek reaksiyon vermiştir. Kayaç ileri derecede yeniden kristalleştiği veya metamorfizmaya uğradığı için, örnek içinde allokem (kimyasal olarak oluşmuş ancak taşınarak çökelen kırıntılar) veya allokem izi yoktur. Kayacın ilksel ortokimyasal bölümleri (su içinde doğrudan kristalleşen) de yeniden kristalleştiği veya metamorfizmaya uğradığı için ortokimyasal bileşenler spar kalsite (>4 mikron kalsit kristalleri) dönüşmüştür. Ortalama kristal boyutu 200 μm 'dir. Kayaç tümsele yakın (%99) kalsit mineralinden yapıldır. Kalsit minerali ile birlikte az oranda (%1) kuvars minareli olağandır. Kalsit mineralleri budinaj yapısı gösterir. Homojen olarak spar kalsit mozaikten oluşan nematoblastik dokuya sahip kayaç (Şekil 3a ve 3b), yeniden kristalleşmiş metamorfik kayalardandır ve mermer olarak adlandırılmıştır (Tablo 1 ve Tablo 2)



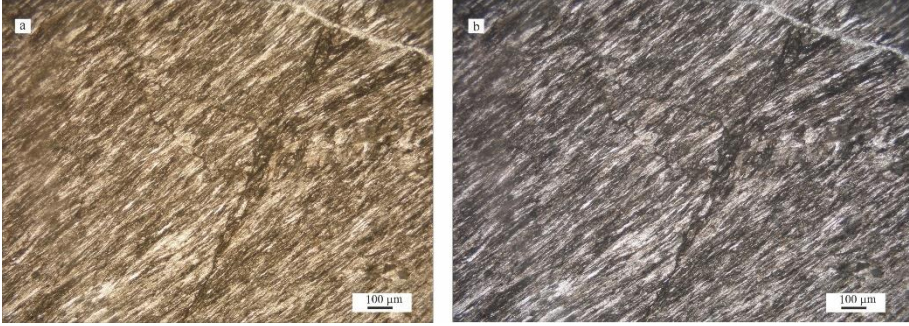
Şekil 2. İnce kesit hazırlanan kayaç örneklerinin görüntüsü

Tablo 1. Kayaçın makroskobik tanımlaması

Köken	Metamorfik
Renk	Gri-beyaz
Doku	Nematoblastik
Tane Büyüklüğü	İnce
Gözenek	Yok

Tablo 2. Kayaçın Modal analizi

Mineral	%
Kalsit	99
Kuvars	1



Şekil 3. Mermer numunelerinin ince kesit görüntüsü

3.2. Kayaçın Kimyasal Özellikleri

Kayaç numunelerinin ana oksitleri ve karbonat miktarları (%) Tablo 3’de verilmiştir. Mermer örneği tümsele yakın miktar da kalsiyum karbonattan (99,22) çok az oranda magnezyum karbonattan ve asitte çözülmeyen kalıntıdan oluşur (Tablo 3).

Tablo 3. Kayacın ana oksitleri ve karbonat miktarları

Major Oksit	(%)
SiO ₂ (%)	0,31
Al ₂ O ₃ (%)	0,03
Fe ₂ O ₃ (%)	0,06
MgO (%)	0,17
CaO (%)	55,57
Kızdırma Kaybı (%)	
Karbonat Miktarları	(%)
CaCO ₃ (%)	99,22
MgCO ₃ (%)	0,37
Asitte Çözülmeyen Miktar (%)	0,34

3.3. Mermerlerin Agregaların Özellikleri

Mermerlerden üretilen agregaların gevşek yığın yoğunlukları 0-5 mm boyutundaki agregalarda 1591 kg/m³, 5-15 mm boyutundaki agregalarda 1339-1382 kg/m³ arasında ve 15-25 mm boyutundaki agregalarda ise 1440 kg/m³'tür. Tane yoğunluğu 2710 kg/m³, su emme değerleri ise %1,31'dir. Donma-çözülme deneyi sonrası kütle kaybı değeri %0,39, magnezyum sülfat deneyi sonrası kütle kaybı %8,06 dır. Mermer agregalarının parçalanma %17,53 aşınma dirençleri ise %23,51'dir (Tablo 4).

Mermerlerden üretilen agregalar sahip oldukları bu fiziksel ve mekanik özellikleri ile aşınmaya, parçalanmaya ve dona karşı dirençli, düşük su emme kapasiteli ve normal yoğunlukta agregalardır.

Organik madde içermeyen mermerler, agregaya haline getirildiğinde içerdiği ince malzeme miktarları da makul seviyededir. Metilen mavisi değeri olarak 1,67 g/kg, kum eşdeğeri de %67,54'dür. Laboratuvar tipi çeneli kırıcı ile üretilen 10-14 mm arası agregaların yassılık indeksi değerleri %21,93, şekil indeksi değerleri de %16,51'dir. Her ne kadar laboratuvar tipi kırıcılar konkasör kırıcılara nazaran daha yüksek oranda yassı ve uzun agregalar üretse de mermerler agregaya haline getirildiğinde küreye yakın parçalar verme eğilimindedir. (Tablo 4).

3.4. Mermer Agregaları ile Üretilen Betonların Basınç Dayanımları

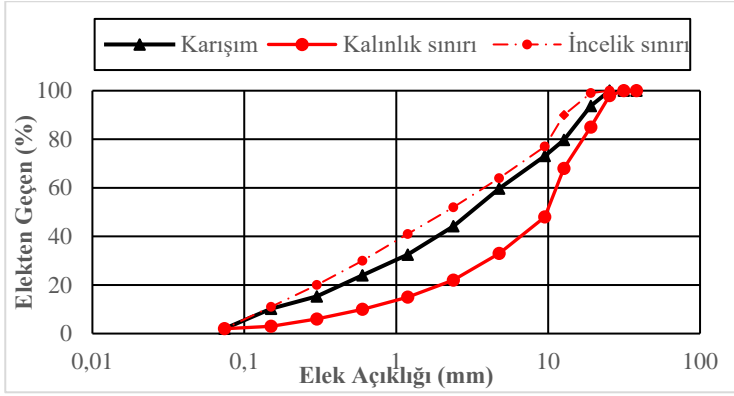
Mermerlerden üretilen agregalarının beton basınç dayanımlarını belirlemek için laboratuvarında 5 karışımdan oluşan deneme betonları hazırlanmıştır. Deneme beton üretiminde kullanılan agregaya dane çapı ve agregaya karışım oranları Şekil 4'de verilmiştir. 0,64-0,40 arasında değişen 5 farklı su/çimento oranında (Tablo 5) hazırlanan deneme betonlarının üretiminde Portland, CEM I 42.5 R tipi düşük alkali içerikli çimento kullanılmıştır.

Tablo 4. Mermerlerin agrega özellikleri. a: Görünür tane yoğunluğu, b: Etüvde kurutulmuş. Tane yoğunluğu, c: Doygun ve yüzeyi kurutulmuş tane yoğunluğu n: deney sayısı

Özellik	Tane Çapı	n	Deney Sonucu	Standart
Gevşek Yığın Yoğunluğu (kg/m ³)	0-5 mm	3	1591± 5	TS EN 1097-3
	5-10 mm	3	1382 ± 27	
	10-14	3	1339 ± 14	
	15-25 mm	3	1440 ± 7	
Tane Yoğunluğu (kg/m ³)	31,5-63	3	^a 2714 ± 6	TS EN 1097-6
		3	^b 707 ± 3	
		3	^c 2710 ± 4	
		3	1,31 ± 0,2	
Su Emme (%)				
Donma-Çözülme (%)	10-14 mm	3	0,389 ± 0,008	TS EN 1367-2
Magnezyum Sülfat (%)	10-14 mm	3	8,06 ± 0,402	TS EN 1367-2
Parçalanma Direnci (%)	10-14 mm	3	17,53 ± 0,12	TS EN 1097-2
Aşınma Direnci (%)	10-14 mm	3	23,51 ± 0,61	TS EN 1097-1
Metilen Mavisi (g/kg)	0-2 mm	3	1,67 ± 0,29	TS EN 933-9
Kum Eşdeğeri (%)	0-2 mm	3	67,54 ± 0,77	TS EN 933-8
Organik madde tayini	0-2 mm	3	Renksiz	TS EN 1744-1
Yassılık İndeksi (%)	10-14 mm	3	21,93 ± 0,92	TS EN 933-3
Şekil indeksi (%)	10-14 mm	3	16,51 ± 1,31	TS EN 933-4

Kullanılan Portland, CEM I 42.5 R çimentonun fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo 6’da verilmiştir. Ayrıca işlenebilirliğini arttırmak için % 1,1-1,5 oranında akışkanlaştırıcı, su azaltıcı özellikte CHRYSO@DELTA 8174 kimyasal katkı kullanılmıştır (Tablo 6).

Sertleşmiş betonun basınç dayanımlarını belirlemek için Şekil 4’de verilen agrega karışımı ve Tablo 5’da verilen karışım oranları kullanılarak hazırlanan taze betonlar 15x15x15 cm boyutunda kalıplara (Şekil 5a, 5b) üç kademede olarak doldurulmuş ve her kademede şişlenmiştir (Şekil 5c). 24 saat sonra betonlar kalıplarından çıkarılarak TS EN 12390-2’e göre (TSE, 2019d) 20 C° de sıcaklıkta su ile dolu kür havuzunda bekletilmişlerdir (Şekil 5d). TS EN 12390-3’e göre (TSE, 2010), 2, 7 ve 28 günlük basınç dayanımı testleri uygulanmıştır.



Şekil 4. Basınç dayanımı deneyinde kullanılan mermer agregaların dane çapı dağılımı (TS 802).

Tablo 5. Deneme betonlarında kullanılan agrega, su/çimento ve katkı oranları

Karışım No	Çimento		Gradasyon (% - kg)						s/ç	Katkı	
	Tipi	Doz (kg)	0-5 mm		5-15 mm		12-22 mm			%	kg
			%	kg	%	kg	%	kg			
K1	42,5 R	250	56	1100	15	300	28	550	0,64	1,4	3,5
K2	42,5 R	300	53	1000	17	320	31	580	0,53	1,1	3,3
K3	42,5 R	350	52	980	16	300	32	600	0,46	1,3	5,2
K4	42,5 R	400	51	920	16	300	33	600	0,40	1,4	5,6
K5	42,5 R	450	50	900	17	300	33	600	0,40	1,5	6,4

Tablo 6. Beton üretiminde kullanılan CEM I 42,5 çimentosunun özellikleri

Çimento Özelliği	CEM I 42,5	TS EN
Kimyasal Özellikler		
MgO (%)	1,49	-
Na ₂ O (%)	0,50	-
K ₂ O (%)	0,74	-
SO ₃ (%)	2,84	≤ 4,0
Kızdırma Kaybı (%)	3,47	≤ 5,0
Cl-Klor (%)	0,006	≤ 0,10
Çözünmeyen Kalıntı (%)	0,34	≤ 5,0
C ₃ S-Trikalsiyum silikat (%)	70,34	-
C ₂ S-Dikalsiyum silikat (%)	0,15	-
C ₃ A-Trikalsiyum alüminat (%)	6,63	-
C ₄ AF-Tetrakalsiyum (%)	10,20	-
Fiziksel Özellikler		
Özgül Ağırlık (g/cm ³)	3,12	-
Özgül Yüzey (g/cm ²)	3371	-
İncelik (0,090 mm elek üstü)	0,5	-
Hacim Sabitliği (mm)	0,5	≤ 10
Priz süresi (dk)	Başlangıç:	≥ 60
	Sona Erme:	-
Basınç Dayanımı (MPa)		
2. gün	31,45	≥ 18
7. gün	43,40	-
28. gün	55,15	42,5-62,5



Şekil.5 Beton hazırlanması, betonun kalıplara yerleştirilmesi ve kürlenmesi

Mermer agregalarından beş farklı su/çimento oranında üretilen deneme betonlarının 2, 7 ve 28 günlük ortalama basınç dayanımları Tablo 7’de verilmiştir. 0,64 su/çimento oranında üretilen K1 betonun 28 günlük basınç dayanımı 31,46 MPa, 0,53 su/çimento oranında üretilen K2 betonun 28 günlük basınç dayanımı 45,17 MPa ve 0,46 su/çimento oranında üretilen K3 betonun 28 günlük basınç dayanımı 47,37 MPa’dır. 0,40 su/çimento oranında üretilen K4 ve K5 betonlarının 28 günlük basınç dayanımı ise 52, 25 MPa ve 58.74 MPa olarak belirlenmiştir (Tablo 7).

Tablo 7. Sertleşmiş betonların 2, 7 ve 28 günlük basınç dayanımları

Karışım No	Hedeflenen Beton Sınıfı	Basınç Dayanımı (MPa)					
		Yaş (Gün)					
		2.	Ortalama	7.	Ortalama	28.	Ortalama
K1	C25/C30	18,25	18,58	24,81	25,32	30,97	31,46
		18,45		25,15		31,24	
		19,04		26,00		32,17	
K2	C30/C37	28,44	28,48	36,61	36,49	45,00	45,17
		28,52		36,47		45,35	
		28,48		36,30		45,16	
K3	C35/C45	30,44	29,88	39,66	39,09	47,69	47,37
		29,95		39,12		47,14	
		29,26		38,48		47,29	
K4	C40/C50	35,05	35,75	44,25	44,38	52,37	52,26
		35,87		44,56		52,48	
		36,34		44,32		51,93	
K5	C45/C55	35,52	35,26	41,70	41,68	57,88	58,74
		35,38		41,56		58,45	
		34,87		41,79		59,90	

3.5. Alkali Silika Reaksiyonu

Alkali silika reaksiyonu deneyi için 0-4,75 mm tane boyutu aralığında mermer agregaları kullanılmıştır (Tablo 8). Deney ASTM C1260-23 (2023)'e göre gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan karışımda alkali içeriği %0,6'dan büyük olan CEM I 42,5 R sınıfı çimento kullanılmıştır. 0,47 su/çimento ve 2,25 agrega/çimento oranlarında karışım hazırlanmış ve bu karışım 25 x 25 x 285 mm ölçülere sahip kalıplarına yerleştirilmiştir (Şekil 6).

Tablo 8. Harç çubuklarında kullanılan agrega boyutu ve oranları

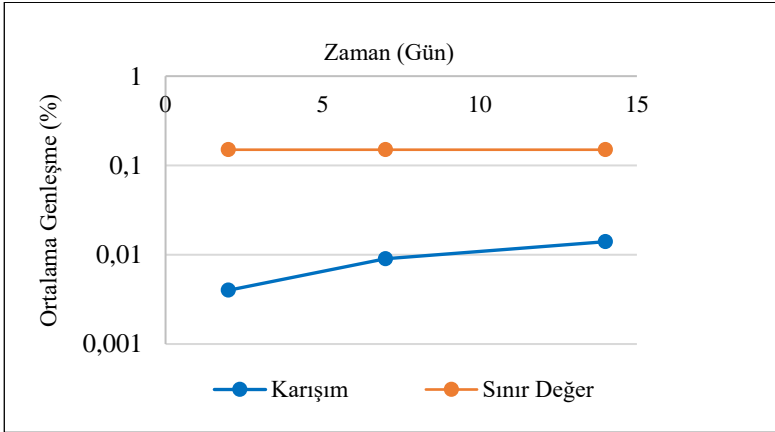
Eleğ açıklığı		Kütle (%)
Geçen	Kalan	
4,75 mm (No:4)	2,36 mm (No:8)	10
2,36 mm (No:8)	1,18 mm (No:16)	25
1,18 mm (No:16)	600 µm (No:30)	25
600 µm (No:30)	300 µm (No:50)	25
300 µm (No:50)	1500 µm (No:100)	15

Çubuklar 24 saat sonra kalıptan çıkarılmış ve saf suya konulmuş ve sonraki 24 saatte ise boy ölçümleri yapılmıştır. Daha sonra 80°C sıcaklıkta sodyum hidroksit çözeltisine daldırılan çubukların, sırayla 2 gün, 7 gün ve 14 günlük boy ölçümleri

yapılmış ve genleşme yüzdeleri hesaplanmıştır. Tüm harç çubuklarında 14 günlük hesaplanan boyca genleşme değerleri limit değer olan %0,15'oldukça altındadır. Bu nedenle mermer agregaları alkali silis yönünden reaktif agregalar değildir (Şekil 7).



Şekil 6. Harç çubuklarının kalıba yerleştirilmesi



Şekil 7. Alkali silika reaksiyonu için hazırlanan harç çubukları genleşme değerleri

4. Sonuç ve Tartışma

Muğla Köyceğiz mermerleri tümsele yakın oranda (%99) kalsit mineralinden oluşan ince taneli mermerlerdir. Mermerlerin ince taneli olması ve nematoblastik bir dokuya sahip olmaları onlardan üretilen agregaları aşınmaya, parçalanmaya ve dona karşı dirençli kılar. Organik madde içermeyen ve ince malzeme bakımından da makul olan bu mermer konkasör ile kırıldıklarında küresel şekle sahip düşük su emme kapasiteli normal yoğunlukta agregalar elde edilir.

Muğla Köyceğiz mermerleri büyük oranda karbonat kökenli minarelerinden oluşur. Karbonat olmayan minerallerin toplam ana oksitleri %0,34'tür. Bu neden ile alkali silika reaksiyonu deneyinde kayda değer bir genleşmeye neden olmamıştır.

Bu mermerlerden elde edilen agregalar ile C25/C30, C30/C37, C35/C45, C40/C50 ve C45/C55 beton sınıflarında betonlar üretmek mümkündür. Sonuç olarak Muğla, Köyceğiz mermerleri beton üretimi için iyi bir agrega kaynağıdır.

Kaynaklar

- ASTM C1301-95 (2014). Standard Test Method for Major and Trace Elements in Limestone and Lime by Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectroscopy (ICP) and Atomic Absorption (AA)
- ASTM C1260-23 (2023). Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method)
- TS 802, 2016. Beton karışım tasarımı hesap esasları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 197-1/A3. (Şubat 2010) Çimento – bölüm 1: Genel Çimentolar- Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri. Ankara: Türk Standartları Enstitüsü, Ankara
- TS 10088 EN 932-3 A1, 2006. Agregaların genel özellikleri için deneyler-Kısım 3: Basitleştirilmiş petrografik tanımlama için işlem ve terminoloji, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 932-2, 1999. Agregaların genel özellikleri için deneyler-Bölüm 2: Laboratuvar numunelerin azaltılması metodu, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS 706 EN 12620, 2009. Beton Agregaları Deneyleri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 1097-3, 1999. Agregaların fiziksel ve mekanik özellikleri için deneyler-Bölüm 3:Gevşek yığın yoğunluğunun ve boşluk hacminin tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 933-4, 2009. Agregaların geometrik özellikleri için deneyler-Bölüm 4: Tane şeklinin tayini-Şekil endeksi, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 1097-2, 2010. Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler-Bölüm 2: Parçalanma direncinin tayini için metotlar, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 12390-3, 2019. Beton-Sertleşmiş beton deneyleri-Bölüm 3: Deney numunelerinin basınç dayanımının tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 12390-2, 2019d. Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 2: Dayanım deneylerinde kullanılacak deney numunelerinin hazırlanması ve küre tabi tutulması. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 1097-1, 2011. Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler-Bölüm 1: Aşınmaya karşı direncin tayini (Mikro-Deval), Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 1367-2, 2011. Agregaların termal ve bozunma özellikleri için deneyler-Bölüm 2: Magnezyum sülfat deneyi, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

- TS EN 933-3, 2012. Agregaların Geometrik Özellikleri İçin Deneyler-Bölüm 3: Tane Şekli Tayini - Yassılık Endeksi. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 1097-6, 2013. Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler- Bölüm 6: Tane yoğunluğu ve su emme oranının tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 1744-1+A1, 2013. Agregaların kimyasal özellikleri için deneyler-Bölüm 1: Kimyasal analiz, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 933-8. 2001. Agregaların Geometrik Özellikleri İçin Deneyler Bölüm 8: İnce Tanelerin Tayini –Kum Eşdeğeri Tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 933-9+A1, 2014. Agregaların geometrik özellikleri için deneyler-Bölüm 9: İnce malzeme tayini-Metilen mavisi deneyi, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

7. Bölüm

Terk Edilmiş Boksit Madenciliğinin Çevre Sağlığına Etkisi: Şarkikaraağaç Boksit Madeni Örneği (Isparta/Türkiye)

Mehmet ÖZÇELİK¹

¹ Prof. Dr., Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü,
32260-Isparta, Türkiye. E-mail: ozcelikmehmet@sdu.edu.tr
Orcid ID: 0000-0003-4511-1946

ÖZET

Boksit, temel olarak çeşitli minerallerden oluşan bir kayadır. En önemlisi, boksit, alüminyum için temel cevherdir. İlk çağlardan beri alüminyum cevheri, toplumsal, ekonomik ve endüstriyel ilerleme ile ilişkilendirilerek alüminyum cevheri madenciliği yapılmaktadır. Şarkikaraağaç ilçesinin güneyindeki boksit cevherlerinin günümüz şartlarında ekonomik ve teknolojik açıdan değerlendirilmesinin uygun olmadığından faaliyetleri durmuştur. Madencilik faaliyetleri üretim aşamasında ve maden kapatıldıktan sonra çevreye zararlı etkiler yaratabilmektedir. Madencilik faaliyetlerinin çevreye olan etkisini değerlendirmek amacıyla öncelikle bölgenin mevcut çevresel durumunun değerlendirilmesi gerekmektedir. Madencilik faaliyetlerinin çevresel etkileri farklı boyutlarda oluşabilmektedir. Madencilik faaliyetinin çevre üzerindeki etkisini inceleyebilmek için ilgili parametrelerin ayrıntılı bir şekilde belirlenmesi gerekmektedir. Özellikle son yıllarda meydana gelen çevresel felaketlerle birlikte, madenciliğin çevreye olan etkisinin değerlendirilmesinin önemini artırmıştır. Bu çalışmada, Şarkikaraağaç'ın güneyinde bulunan Beyşehir Gölü havzasındaki terk edilmiş boksit maden sahasının çevre sağlığına olan etkisi vurgulanmak istenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Boksit madeni, Alüminyum, Çevre sağlığı, Madencilik

1. GİRİŞ

Madencilik tarih öncesi çağlardan beri sürekliliğini devam ettirmekte ve toplum tarihi, endüstriyel gelişme, insanoğlunun kendisine sunulan kaynakları kullanma ve becerisiyle devam etmektedir. Mineraller, havacılık sanayi, tarım, inşaat ve inşaat mühendisliği, savunma, enerji, bilgi ve iletişim teknolojileri, sağlık ve ulaşım gibi ekonomik sektörlerde vazgeçilmez girdilerdir. Madencilik, değerli minerallerin veya diğer jeolojik malzemelerin topraktan, bir cevher kütlesinden çıkarılmasıdır. Genellikle madencilik faaliyetlerinin çevresel etkileri hem üretim aşamasında hem de maden kapatıldıktan sonra yıllar boyunca olumsuz etki yaratabilmektedir. Buna göre, madencilik kaçınılmaz olarak çevreyi değiştirir ve bu nedenle çevresel bir etkiye sahiptir (Bell & Donnelly, 2006). Çevre ise insanlar için uygun yiyecek, barınak ve hammadde kaynağı olarak hizmet etmektedir. Bununla birlikte, insanların hayatta kalmak için doğal kaynaklara olan bu bağımlılığı, doğal çevre ile insanlar arasındaki çatışmaları onlarca yıldır yoğunlaştırmış ve bunun sonucunda jeolojik ve biyokimyasal süreçleri etkilemiştir (Doyle & Runnells, 1997; Blanchette & Lund, 2016; El-Zeiny & El-Kafrawy, 2016; Søndergaard, vd. 2018). Belki de hiçbir doğal kaynak, insan faaliyetleri tarafından topraktan daha fazla değiştirilmemiştir (Muellegger, vd. 2013; Betournay, 2016; Mollema & Antonellini, 2016). Boksit, altın, kömür gibi madencilik faaliyetlerinde açık ocak yöntemini kullanılmaktadır (Mossa & James, 2013; Oggeri vd., 2019). Bu yöntem, kaynakların çıkarılması için en yaygın ve ucuz yöntem olarak kabul edilirken, çevresel etkilerinin düzeltilmesi uzun yıllar alabilen ciddi çevresel etkilere neden olmaktadır (Younger vd., 2002; Robles-Arena & Candela, 2010; Bangian, vd., 2012; González vd., 2018). Cevheri madencilik amacıyla açığa çıkarmak için büyük miktarlarda örtü malzemeyi kazmak gerekir (Fourie & Dohm, 1992; González vd., 2018; Oggeri vd., 2019). Kaldırılan örtü daha sonra maden kapatma rehabilitasyonu sırasında geri doldurma işleminde kullanılabilir (Betournay, 2016). Ancak, maden çıkartılan alanda restorasyon ve rehabilitasyon faaliyetleri yürütülmezse, kazılan boşluklar zamanla ocak göllerine dönüşebilmekte ve sürdürülebilir çevre için tehdit oluşturmaktadır (Fabri vd., 2013; Boehrer vd., 2016; Williams vd., 2020). Bilinen en büyük etkiler arasında maden sahalarında ocak göllerinin gelişmesi, açık ocak madenciliğinin yaygın bir yan etkisidir (Blanchette & Lund, 2017). Ocak gölleri ayrıca Asit Maden Drenajına yol açarak kötü su kalitesine neden olabilirler (Koschorreck & Tittel, 2002; McCullough & Lund, 2006; Castendyk & Webster-Brown, 2007; McCullough vd., 2012; Mhlongo & Dacosta, 2014; Castendyk vd., 2015; Søndergaard vd., 2018). Boksit madenciliğiyle ilişkili çevre kirliliği yıllar sonra ortaya çıkabilecek zararlar nedeniyle endişe verici olarak değerlendirilmektedir. Şarkikaraağaç ilçesinin güneyindeki boksit cevherlerinin

bugünkü durumlarda ekonomik ve teknolojik açıdan işletilmesi ve değerlendirilmesi imkansız olduğundan boksit maden ocakları kapatılmıştır. Bu çalışmanın konusu, Şarkikaraağaç güneyinde bulunan Beyşehir Gölü havzasındaki terk edilmiş alüminyum cevheri yatağının çevresel sağlık üzerindeki etkisidir.

2. MATERYAL VE YÖNTEMLER

2.1 Çalışma alanı

Isparta İli Şarkikaraağaç ilçesinin güneyindeki maden sahası, Beyşehir gölünün kuzeydoğusunda Fele köyünün yaklaşık 2 km kadar kuzeybatısındadır. Çalışma alanının koordinatları Şekil 1 de görülmektedir.



Şekil 1. Çalışma alanının Lokasyon haritası (<https://www.wekeo.eu/>)

2.2 Boksit madeni hakkında genel değerlendirme

Alüminyum üretiminde çok olarak kullanılan hammadde kaynağı boksittir. Boksit sulu alüminyum oksit minerallerinin karışımından oluşan bir mineral grubunun adıdır. Boksitlerin genel formülü $Al_2O_3 \cdot nH_2O$ olup, Al_2O_3 içeriklerine göre göre gibsitik/hidrarjilit ($Al(OH)_3$), böhmitik ($AlO(OH)$) ve diyasporitik ($\alpha-Al_2O_3 \cdot H_2O$) boksitler olarak üç grupta toplanmaktadır. Boksit, homojen bir kimyasal bileşime ve kristal yapıya sahip bir mineral olmayıp, bu minerallerin heterojen bir karışım şeklinde doğada bulunmaktadır. Boksit Mohs sertliği 1-7, yoğunluğu $2,5-3,5 \text{ g/cm}^3$ arasında değişen alüminyum oksit ve hidrositlerin bir karışımıdır. Dünyadaki metal alüminyum üretiminin neredeyse %90 'ı bu cevherden sağlanmaktadır.

2.3 Türkiye'deki Boksit yatakları

Ülkemiz toplam dünya rezervinin %1.24'üne sahip olup, toplam 430 milyon ton boksit rezervine sahiptir (Çağatay & Arman, 1982; Gülfen, 1996). Türkiye'de bugüne kadar tespit edilen yaklaşık 200'e yakın boksit oluşumuna rastlanılmıştır. Bu oluşumlar çoğunlukla güneyde ve batıdan doğuya uzanan Toros Kuşağında bulunmaktadır. Türkiye'nin önemli boksit yatakları ve bazı özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Türkiye' deki Boksit yatakları ve bazı özellikleri (Gök, 2019)

Bulunduğu Bölgeler	Mineralojik Karakteri	Oluşum Tipleri	Tenör (%)	
			Al ₂ O ₃	SiO ₂
Milas-Yatağan	Böhmitik	Karst-Allokton	~43-55	~4-14
Isparta Şarkikaraağaç	Diyasporitik Böhmitik (Demirli)	Lateritik-Allokton	~33-45	~10
Seydişehir-Akseki	Böhmitik	Karst-Yarı Allokton	~57	~7
Bolkardağı-Karaman	Diyasporitik Böhmitik Demirli	Karst-Allokton	~53	~12
Adana-Saimbeyli	Diyasporitik	Karst-Allokton	~50-52	~6-10
Payas-İslahiye	Diyasporitik Böhmitik (Demirli)	Karst-Yarı Allokton	~7-35	~13-25
Zonguldak-Kokaksu	Böhmitik (Kısmen gipsit içerir)	Karst-Yarı Allokton	~45	~14

2.4 Bölgedeki Boksit madeni potansiyeli

Bölgede ilk araştırma Monod (1977) tarafından yapılmıştır. Daha detaylı jeolojik çalışmalar Kelter (1968) ve Öztürk ve diğerleri tarafından yapılmıştır. (1981). Balzer'in (1968) Kıyakede köyünün güneyi ile Kireli ilçesi arasında oldukça dar bir alanı kapsayan çalışmasında bazı önemli tektonik ve stratigrafik sorunlar ele alınmıştır. Bölgede ilk boksit aramaları Lahn ve Romberg (1939) tarafından başlatılmış ve bu çalışmada burada boksitleşmeye topografik yükseltiye bağlı olarak aşırı sıcak bir iklimin (Şekil 2) neden olduğu ileri sürülmüştür. Brennich (1957), Neojen döneminin tropikal iklim koşulları sonucunda boksitlerin bazik volkanik kayalar üzerinde çok ince bir örtüyü andıran lateritik bir kabuk olarak oluştuğunu belirtmiştir. Desprairies & Gutnic (1970), "Mezozoik ferralitler" olarak adlandırdıkları boksitlerin, Kimmeriden dönemine ait diyabaz yükselmelerinden oluştuğunu belirtmiştir. Çetin ve Bulur (1979)' un tüm boksit kuşağının ekonomik potansiyelini belirlemek amacıyla yaptığı çalışmada,

paleozoik birimlerin üzerlerine ittiği üst Jura öncesi doleritlerin ve üst Jura kireçtaşlarının bulunduğunu, boksitlerin doleritlerin yüzeyde ayrışmasıyla oluştuğu vurgulanıyor. Çağatay ve Arman (1982), Şarkikaraağaç'ın güneyindeki boksitlerin Türkiye'nin bilinen tek otokton yatakları olduğunu ileri sürmektedir.



Şekil 2. Çalışma alanını da kapsayan bölgenin Yükseklik haritası
(<https://en-gb.topographic-map.com/>)

2.5 Çalışma alanının Genel Jeolojisi

Beyşehir-Hoyran naplarının Sultandağları'na bitişik kısmını oluşturan çalışma alanındaki birimler, Monod (1977) tarafından otokton olarak tanımlanan Kambro-Ordovisiyen formasyonlar ve mesozoyik karbonatlar olarak ayırt edilmektedir. Kelter (1968) ve Öztürk ve ark. (1981) aynı birimleri daha ayrıntılı olarak haritalamış ve farklı isimler altında tartışmıştır. Terk edilmiş maden sahasının batısında Seydişehir formasyonu kemer şeklinde yüzeyler. Bunun üzerinde ya Çaltepe formasyonunun dolomitleri ya da Fele formasyonunun bindirme ve ters faylarla konglomera düzeyleri yer alır. Öte yandan, Kıyakkede-Göztepe dağı ile Fele köyü arasındaki bölgede ve Fele tepesinin doğusunda kalan bölümde ise seydişehir formasyonuna ait birimlerin hem Fele formasyonu üzerine yoğun blok hareketleri ve bindirmelerle geldikleri hem de fele tepesinin doğusunda yer aldığı görülmektedir. Tektonik temas halindeki diğer birimlerle yan yana yer almaktadır. Burada birbirini takip eden çok sayıda bindirme çizgisi bulunmasına rağmen Koçyiğit (1984) çalışmasında, kuzey-kuzeybatı, güney-güneydoğu yönünde uzanan, Beyşehir Grabeni'nin doğu kısmını sınırlayan Beyşehir Fayı'nın varlığından söz etmektedir. Seydişehir bölgesindeki çaltepe tipi kesitte dolomitler ile yumrulu kireçtaşları arasında bulunan gri renkli kireçtaşlarına Fele civarında rastlanmaz. Yoğun tektonik faaliyetler sonucunda hem Çaltepe hem de Seydişehir formasyonlarına ait birimlerin tamamı yüzeye

çıkmamış ve çoğunlukla tektonik dilimler halinde yerleşmişlerdir. Genellikle doğu-batı ve kuzeydoğu-güneybatı yönlü yırtılma fayları, bölgenin genel konumunun kazanılmasını sağlayan bindirme hareketlerinin ardından ortaya çıkan tektonik evrelerle oluşmuştur. Bölgenin çalışma alanını kapsayan kapsamlı jeoloji haritası Şekil 3'te gösterilmektedir.



Şekil 3. Çalışma alanını da kapsayan bölgenin Genel Jeoloji Haritası
(www.yerbilimleri.mta.gov.tr)

2.6 Arazi çalışmalarının değerlendirilmesi

Şarkikaraağaç ilçesinin güneyinde köken, mineraloji, kimyasal bileşim ve oluşum yaşı bakımından birbiriyle ilgisi olmayan, stratigrafik olarak kontrol edilen iki cevher kuşağı yüzeye çıkmaktadır. Ayhan ve Karadağ (1985) yaptıkları çalışmaya göre alt zonun genellikle alt-orta kambriyen yaşlı dolomitler arasında açısız uyumsuzluk çizgisi boyunca kesintili olarak gözlenen allokton kökenli "boksitli demir" oluşumları ile temsil edildiğini belirtmişlerdir. Çaltepe formasyonu ve Dogger yaşlı Feletepe formasyonuna ait kayalar. Esas olarak hematit, kamosit, kaolinit, pirokroit, diaspor ve götit gibi mineralleri içerir. Oluşumları oluşturan kaynak kaya türü muhtemelen Sultan Dağları'nın kuzeyinde gözlenen Ordovisiyen yaşlı kırmızı kumtaşlarıdır (Şekil 4). Lateritik oluşum gösteren ve demirli boksitler sınıfına giren bu yataklar ortalama %33,32 Al_2O_3 , %14,79 SiO_2 , %38,48 Fe_2O_3 , %4,21 TiO_2 tenörüne sahiptir (Ayhan & Karadağ, 1985).



Şekil 4. Maden yatağını oluşturan kaynak kaya türü Sultandağları'nın kuzeyinde gözlenen Ordovisiyen zamanda oluşmuş yaşlı kırmızı kumtaşlarının ocak alanındaki görünümü

Üst Jura yaşlı Kıyakkede Formasyonu ile Üst Jura-Kretase yaşlı Karayaka Formasyonu arasındaki üst kuşaktaki cevherler, boksit demirinden daha kalın bir tabaka halinde bulunur ve "demirli boksit" adı verilir. Bu otkton boksitlerin ana mineralleri böhmit, diaspor, kaolinit, hematit ve götittir. Anataz, manyetit, ilmenit, pirit, kalsit ve klorit de bulunmuştur. Karasal ortamlarda yalnızca hafif asidik koşullar altında oluşan ferruginous boksitler, geleneksel boksitlere göre yüksek miktarda silika ve düşük miktarda alüminyum içerir.

2.6 Ekonomik Değerlendirme

Boksit kalitesini belirleyen en önemli ölçütlerden biri cevherdeki elde edilebilir alümina (Al_2O_3) ile silis (SiO_2) içeriği oranıdır. Alümina endüstrisinde "modül" olarak adlandırılan bu oran, metalurjik kalitede boksit cevherleri için kritik öneme sahiptir. Silis içeriğinin önemli bir göstergesi olan modül değerine göre yüksek alümina içeriğine sahip cevherin modül değeri 20'den büyük iken, yüksek silis içeriğine sahip cevherlerin modül değeri 4'ten küçüktür (Tablo 2) (Gök, 2019).

Tablo 2. Modül oranı ve Fe_2O_3 tenörüne göre boksitler (DPT, 2001)

Modül Değeri	Cevher Tipi
$Al_2O_3 / SiO_2 > 20$	Yüksek alüminalı cevher
$Al_2O_3 / SiO_2 : 10-20$	Alüminalı cevher
$Al_2O_3 / SiO_2 : 4-10$	Silisli cevher
$Al_2O_3 / SiO_2 < 4$	Yüksek silisli cevher
Fe_2O_3 içeriği	Cevher tipi
$\%Fe_2O_3 > 25$	Çok demirli cevher
$\%Fe_2O_3 = 10-25$	Demirli cevher
$\%Fe_2O_3 < 10$	Az demirli cevher

Dünya alümina üretiminin %90'dan fazlası “Bayer Prosesi” ile sağlanmaktadır. Bayer Prosesi ile gerçekleştirilen alümina üretiminde boksit cevheri uygun boyutta kırıldıktan sonra NaOH sulu ortamda değirmenlerde öğütülerek pülp (katı-sıvı karışımı) haline getirilir. Gibsit ve/veya böhmit bakımından zengin boksit cevherlerin yüksek sıcaklıklarda ve basınç altında NaOH çözeltisi ile reaksiyona sokulmak suretiyle, kimyasal yolla cevherdeki alüminyum hidroksit çözünerek, sodyum alüminat (NaAlO_2) çözeltisi halinde sıvı faza geçer ve sonrasında alüminyum hidroksit ($\text{Al}(\text{OH})_3$) kristali halinde çöktürülür. Elde edilen hidrat, fırınlarda 1100–1200 °C sıcaklıkta kimyasal bağlı suyu uçurmak amacıyla kalsine edilerek alümina elde edilmektedir. Liç işleminde demir, titanyum vb. gibi çözünmemiş bileşikler içeren katı atıklar (kırmızı çamur) çökeltme tankında çöktürüldükten sonra atık barajına sevk edilip depolanmakta ve ihtiva ettiği kostik sodanın çevreyi kirletmesi önlenmektedir (Vural, 1977; Kılıç, 2013). Alümina üretiminin Bayer Prosesi ile üretilmesinden dolayı, boksit rezervlerini sınıflandırırken bu proses teknolojisinin özellikleri dikkate alınır. Önceleri %5'ten fazla SiO_2 içeren cevherlerin işlenmesi ekonomik görülmemekteydi, ancak bugün için teknolojinin seviyesi ve teçhizat %6,5–7 SiO_2 içerikli boksitlerin ekonomik olarak kullanılmasını mümkün kılmaktadır. “ $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ ” modül oranının 7'den büyük olması daha ekonomik olmaktadır (Aksu, 2001). Cevher tipine göre boksitlerin çözünme sıcaklığı ve basınç değerleri Tablo 3'de verilmiştir. Diyasporitik boksitlerden alümina üretimi için böhmitik ve gibsitik boksitlere göre çok daha yüksek sıcaklık ve basınç gerekli olmaktadır. Bu durum işletme maliyetlerini oldukça artırmaktadır. Ayrıca sıcaklık ve basıncın artmasıyla birlikte cevherdeki silis bileşiklerinin çözünmesi de artmakta ve çözünen silis alümina kaybına neden olmaktadır ve bu nedenle Al kazanım verimleri düşmektedir.

Tablo 3. Boksitlerin NaOH çözeltisinde tepkimeye girme sıcaklık ve basınçları

Boksit cevheri tipi	Sıcaklık (°C)	Basınç (atm)
Gibsitik boksitler	>100	3-7
Böhmitik boksitler	>200	28-40
Diyasporitik boksitler	>240	46-60

Isparta İli Şarkikaraağaç ilçesinin güneyinde bulunan boksit sahaları için MTA tarafından yapılan çalışmalarda, sahaya ait ortalama tenörlerin cevher için %39,62 Al_2O_3 , %22,27 Fe, %13,72 SiO_2 , %4,31 TiO_2 ve yarı cevher için %27,43 Al_2O_3 , %20,63 Fe, %26,66 SiO_2 , %4,28 TiO_2 içerdiği belirlenmiştir (Öztürk vd., 1981). Ayhan ve Karadağ (1985) tarafından yayımlanmış çalışmada da; sahadaki demirli boksitlerin kimyasal bileşiminin ortalama değerlerinin %34,21 Al_2O_3 ,

%28,71 Fe₂O₃, %19,30 SiO₂, %4,27 TiO₂ ve boksitli demirlerin kimyasal bileşiminin ise ortalama değerlerinin %15,56 Al₂O₃, %49,40 Fe₂O₃, %14,27 SiO₂, %0,64 TiO₂ olduğu bildirilmiştir. Ayrıca bölgede çalışan Özel Şirketler tarafından yapılan çalışmalarda, sahadaki demirli boksitlerin ortalama kimyasal bileşimi olarak %34,21 Al₂O₃, %28,71 Fe₂O₃, %19,30 SiO₂, %4,27 TiO₂ değerleri sahip olduğunu şirket raporlarında belirtmişlerdir. Bu verilere göre, sahaların ortalama Al₂O₃ tenörünün %40' ın altında ve ortalama SiO₂ tenörünün ise %13,5' in üstünde olduğu görülmektedir. Yani, boksit kalitesini belirleyen en önemli kriterden birisi cevherdeki alümina (Al₂O₃) ile silis (SiO₂) içeriği arasındaki oran olan silis modül değeri ise 3'ün altındadır (%40 Al₂O₃/%13,5 SiO₂). Tablo 2' de görüldüğü üzere, inceleme sahasındaki cevherleşme yüksek silisli boksit cevheri sınıfında yer almaktadır. Dünyada alümina üretiminin %90'dan fazlasının sağlandığı Bayer prosesinde boksit cevherlerinin işlenmesinde cevherin ortalama SiO₂ içeriğinin %7-8' in altında ve silis modül oranının da 6' nın üstünde olması ekonomik ve teknik açılardan gerekmektedir. İnceleme alanının da içinde bulunduğu Şarkikaraağaç ilçesinin güneyindeki cevherler bu şartları sağlamamaktadır. Bu nedenle, Çalışma alanını da kapsayan bölgedeki boksit cevherlerinin günümüz (Bayer Prosesi Teknolojisi) koşullarında ekonomik ve teknolojik açıdan işletilmesi ve değerlendirilmesi mümkün olmadığından boksit maden ocakları terk edilmiştir.

2.7 Asit madencilik drenaj ve su kalitesi

Doğal manzarayı değiştirmenin yanı sıra, metal içeren maden artıkları ve birikmiş aşırı yük, çevre, insan sağlığı ve tarım için ciddi kirlilik tehlikeleri oluşturmaktadır. Asit madeni drenajından kaynaklanan yeraltı suyu kirliliği ve maden atıklarının bertaraf edilmesinden kaynaklanan sızıntı en yaygın çevresel kaygılardır. Kükürt bakımından zengin bir kaya, ayrışma veya madencilik işlemlerinin bir sonucu olarak ortaya çıktığında, su varlığında sülfürler reaksiyona girerek sülfürik asit oluşturur. Bu şekilde oluşan asit, yüksek konsantrasyonları destekleyen cevherde bulunan metalleri daha fazla çözer ve süzer (Kusin vd., 2020). Maden ocağındaki faaliyetler durdurulduğunda yeraltı suyu seviyesi yüzeye ulaşana veya üstteki akiferlere boşalana kadar su seviyesi yükselir. Bu birkaç ay veya birkaç yıl sürebilir. Ocak gölleri, açık kesim madencilik faaliyetleri sona erdiğinde ve kalan ocak yer, yüzey ve yağmur suyuyla dolduğunda oluşur. Terk edilmiş açık maden ocaklarının su basmasıyla göller oluşur ve bu göllerin birçoğu zehirlidir ve komşu topluluklar ve ekosistemler için risk oluşturur. Ocakta oluşan göllenme ile sülfid minerallerinin oksidasyonu durur, ancak metal iyonlarını ve sülfatları çözerek sülfürik asit oluşturur. Bunun etkisi kayaların doğasına bağlıdır. Kalsit veya diğer karbonat mineralleri içeriyorsa asidik maden

suyu nötrale edilebilir ve metaller hareketsiz kalabilir. Bununla birlikte, yaygın olarak, su, özellikle demir, çinko, bakır, kurşun, kadmiyum, manganez ve alüminyum olmak üzere yüksek metal konsantrasyonlarına neden olan mevcut metal bileşiklerini çözer. Maden sularının kalitesi önemli ölçüde değişir; alkali, asidik, demirli, yüksek tuzlu veya temiz olabilirler. Madencilik, akarsularda ve kuyularda su seviyelerini ve kalitesini düşürmüştür (Atanackovic vd., 2013). Terk edilmiş maden ocağında görülen kahverengimsi ila yeşilimsi arasında değişen suyun rengi, suyun kirliliğini açıkça göstermektedir (Şekil 5). Düşük pH, yüksek elektrik iletkenliği, yüksek konsantrasyonda sülfat ve demir iyonları ve toksik ağır metaller, su kalitesinin bozulmasını karakterize eden fizikokimyasal ve biyolojik parametrelerden bazılarıdır. Ayrıca ağır metallerin sızması, su kalitesinin bozulmasının ana nedenleridir.



Şekil 5. Terk edilmiş maden ocağında oluşan ocak gölü

Su kalitesi, çevreleyen jeoloji ve havza etkileşiminin (örneğin, yeraltı suyu ve nehirlere bağlantı, kıyı bitki örtüsü, maden deşarjı) bir fonksiyonu olarak ocak gölleri arasında değişiklik gösterir ve bu nedenle alkaliden asiditeye, temizden tuzluya ve toksikten olmayana kadar tüm spektrumu kapsar. Cevher içeren pek çok arazi sülfidler açısından zengindir (özellikle FeS_2). Madencilik bu malzemeleri su ve havaya maruz bıraktığında, asitliği üretmek için oksidasyon hızlanır ve bu da çevredeki kayalardan metalleri süzerek asit madeni drenajı oluşturur. Büyüklükleri ve yer altı suyu ve yüzey suyu çıkışları yoluyla daha geniş bir havza ile potansiyel etkileşimleri sayesinde, ocak gölleri önemli çevresel etkilere sahip olabilir (Kamble, vd. Bhosale, 2019). Maden gölleri, bir su toplama havzası için risk oluştururlar. Genellikle, ekonomideki değişiklikler madenlerin rehabilitasyon yapılmadan terk edilmesine neden olmaktadır (Şekil 6).



Şekil 6. Terk edilmiş maden ocağında oluşan ocak gölü

2.8 Boksit madenciliğinin çevre sağlığı üzerine etkisi

Madencilik faaliyetlerinin çevresel sorunları arasında su, toz ve sızıntı nedeniyle toprak kirliliği yer almaktadır. Bu nedenle maden sahalarının yakınında yaşayan insanların sağlıkları üzerinde de olumsuz etkilere neden olmuştur (Jalloh & Kororma, 2021). Doğal boksit cevheri, maddeleri insan sağlığını etkileyen alüminyum hidroksit, demir oksit, titanyum oksit ve reaktif silikadan oluşur. Boksit cevherinin ana içeriği yüzde 32-52 olan alüminyum hidroksittir. Boksit tozuna maruz kalmanın önemli etkileri arasında burunda ağrı ve kızarıklık, öksürme, ciltte ağrı ve kızarıklık ile birlikte gözlerde soyulma ve kaşıntı olduğundan, alüminyum hidroksite aşırı maruz kalmak sağlığa zararlı olabilir. Araştırmalar, bu maddelerin yetişkinlerde kronik beyin sendromu, sebepsiz kaygı, unutkanlık veya Alzheimer ve Parkinson hastalığı gibi nörolojik sorunlara yol açabileceğini göstermiştir (Rosli vd., 2021). Boksitte bulunan demir oksit içeriğinin yüzde 15-34, alüminyum hidroksite göre daha az olduğu kaydediliyor. Demir oksit, yolların, nehirlerin ve denizlerin kırmızımsı olmasına neden olan maddedir. Demir oksidin solunum sistemine uzun süre maruz kalması, karaciğer dokusunda demir birikmesine yol açabilir ve karaciğer sisteminin işleyişini etkileyebilir (Periaiah vd., 2021). Talasemi ve hemofili hastalarında ya da karaciğer ve dalak şişmesinden muzdarip kişilerde durum bu nedenle daha da kötüleşir. Daha sonra, titanyum oksit, boksitteki üçüncü içeriktir. Bu maddeye maruz kalmak, egzamalı cilt, kalp sorunları ve karaciğer sorunları yaşayan kişilerde olumsuz etki yapabilir. Ayrıca boksitte reaktif silika içeriği yüzde 1-8'dir. Yüksek konsantrasyonlara maruz kalmak nefes darlığına, göğüs ağrısına, yorgunluğa, bayılmaya ve hatta ölüme neden olabilir. Daha uzun maruz kalma süreleri akciğerlerin iltihaplanmasına neden olur (Lee vd., 2017). Daha sonra daha da kötüleşecek ve kronik bronşit veya akut solunum yolu enfeksiyonları silikoz gibi sorunlara neden olacaktır (<https://www.malaysiakini.com>).

Beyşehir Gölü havzasında yer alan diğer madencilik faaliyetleri ile birlikte terkedilmiş boksit maden sahaları, çalışma alanındaki su kaynaklarını ciddi şekilde etkilemektedir. Madencilik faaliyeti sonrasında atık ürünler doğrudan toprağa döküldüğü için toprak kirliliği veya toprak kirlenmesi meydana gelmektedir. Toprağın dengesiz pH'ı, tahrip olmuş tarım ürünleri veya güvensiz mahsuller dahil olmak üzere tarımsal faaliyetleri etkileyecek ve sonunda ekonomik sorunlara yol açacaktır. Yağan yağışlarla birlikte alüminyum hidroksit, demir oksit ve ağır metaller içeren kirli su sağlığınıza zarar vermektedir. Alüminyum bir nöro-toksindir ve Alzheimer ve kemik hastalıklarıyla bağlantılıdır. Bu arada, boksit içindeki demir oksit, potansiyel olarak kronik alımda aşırı demir yüklenmesine neden olarak gastrointestinal semptomlara, karaciğer hastalığına, kardiyomyopatiye, diyabete ve hiperpigmentasyona

neden olabilir (Kırat & Savcı, 2022). Madencilik faaliyetlerinin tüm Beyşehir Gölü havzasındaki hem yeraltı suları hem de yüzey suları üzerinde oldukça olumsuz etkisi olduğu gözlemlenmiştir. Boksit madenciliği ve patlatma, cevher çıkarma, ağır taşıtların taşınması gibi ilgili faaliyetler, göle su sağlayan küçük kaynaklar ve akarsular üzerinde olumsuz etkiye sahiptir. Yakındaki yamaçlarda depolanan aşırı yük, artan toprak erozyonu seviyesine de katkıda bulunur. Genellikle yoğun toprak erozyonu nedeniyle Beyşehir Gölünde özellikle yağışlı dönemlerde bulanıklığın arttığı gözlemlenmektedir. Göl sularındaki bulanıklığın artmasıyla su habitatlarının bozulmasına ve içme suyu kaynaklarının kirlenmesine yol açmıştır. Çalışma alanı yüksek yağış aldığından, kirleticilerin cevher yataklarından hareketliliği büyük ölçüde artabilir. Su üzerindeki etkiler, ağır metaller veya diğer toksik ürünlerle kontamine olabilecek tortuların birikmesini içerir. Suyun yollarda toz önleme, ağaçlandırma ve evsel tüketim gibi yan faaliyetler için kullanılması, kıt su kaynağı üzerinde ek bir baskı oluşturmaktadır. Bölgede yaşayan insanlarda boksit alımının etkilerini araştırmak için hiçbir çalışma yapılmadığından su kirliliği ile ilgili ayrıntılar bilinmemektedir. Ayrıca, tortulardaki boksit ve ağır metaller suda yaşayan hayvanlar veya bitkiler tarafından absorbe edilerek besin zincirinin çeşitli seviyelerini etkileyebileceğinden, içme suyu kirliliği tek endişe konusu değildir.

3. SONUÇLAR

Şarkikaraağaç güneyinde uzanan kaya oluşumları birbirinden çok farklı iki ayrı kuşağı ortaya çıkarıyor. İlk cevherleşmiş kuşak Çaltepe Formasyonu kayaları ile Fele Tepe Formasyonu kayaları arasındaki uyumsuzluk boyunca yer almaktadır. Başlıca hematit, kamosit, kaolinit, pirokroit, diaspor ve götit minerallerini içeren mineraller boksit demir olarak tanımlanmaktadır. İkinci mineral kuşağı ise Kıyakede Formasyonu ile Karayaka Formasyonu arasında yer alır ve tamamı doleritlerden türemiştir. Boehmit, diaspor, kaolinit, hematit ve götit ile temsil edilen cevherler demirli boksit olarak tanımlanmaktadır. Bu çalışma kapsamında, Şarkikaraağaç ilçesi güneyinde yer alan terk edilmiş maden sahası değerlendirilmiştir. Dünyada alümina üretiminin %90'dan fazlasının sağlandığı Bayer prosesinde boksit cevherlerinin işlenmesinde cevherin ortalama SiO_2 içeriğinin %7-8 'in altında ve silis modül oranının da 6'nın üstünde olması ekonomik ve teknik açılarından gerekmektedir. Bölgedeki sahaların ortalama Al_2O_3 tenörünün %40 'ın altında ve ortalama SiO_2 tenörünün ise %13,5 'in üstünde olduğu görülmektedir. İnceleme alanındaki cevherler bu şartları sağlamamaktadır. Bu nedenle, boksit cevherlerinin günümüz (Bayer Prosesi Teknolojisi) koşullarında ekonomik ve teknolojik açıdan işletilmesi ve değerlendirilmesi mümkün olamayacaktır. Gelişi güzel yapılan boksit

madenciligi faaliyeti birçok açıdan çevreye zararlıdır. İlgili şirketler tarafından terk edilen arazilerin ıslahı ve restorasyonu için güçlü ve etkili önlemler bulunmamaktadır. Geçici bir ekonomik faaliyet olan madencilik, uzun vadeli sosyo-ekonomik ve çevresel sağlığı yönünden olumsuz izler bırakmaktadır. Yöre halkına istihdam sağlamasına rağmen, gerçek yararlanıcılar, dışarıdan gelenler ve şirket sahipleridir. Bölgede restorasyon yapılmadan terk edilmiş olan maden, madencilğin nasıl yapılmaması gerektiğine bir örnektir. Bu nedenle, mevcut tüm maden ocaklarının bir an önce sağlıklı bilimsel önlemlerle kapatılması ve zorunlu normlara göre doğala yakın şartlara getirilmesi için girişimlerde bulunulacaktır. Ekolojik olarak kırılğan ve savunmasız bölgede yeni madencilik faaliyetlerine izin verilmemelidir. Madenlerin işletilmesi kanun ve yönetmeliklerde belirtilen çevre standartlarına uygun olmalıdır. Madencilik projeleri için hazırlanan ÇED raporlarında, ocak ıslah yöntemleri, bitki örtüsü, iklim, hava ve su üzerindeki olası her etkiyi kapsayan çevresel etkiler değerlendirilmelidir. Boksit, düşük demir ve silis ana kayacının ayrışma ürünü olarak oluşmaktadır. Bundan dolayı ayrışma süreci uzun yıllar boyunca sürmektedir. Bu nedenle, Beyşehir Gölü havzasında yer alan Şarkikaraağaç ilçesi güneyindeki terk edilmiş boksit madeni sahanın çevre sağlığı üzerine olumsuz etkilerinin giderilmesi için sahanın rehabilitasyonu zorunlu olmaktadır.

4. KAYNAKLAR

- Atanackovic N., Dragisic, V., & Stojkovic, J., Papic P., & Zivanovic, V. (2013). Hydrochemical characteristics of mine waters from abandoned mining sites in Serbia and their impact on surface water quality. *Environmental Science and Pollution Research*. <https://doi.org/10.1007/s11356-013-1959-4>
- Ayhan, A., & Karadağ, M. M. (1985). Şarkikaraağaç (Isparta) güneyinde bulunan boksitli demir ve demirli boksit yataklarının jeolojisi ve oluşumu. *Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni*, 28,137 -146.
- Balzer, H. J. (1968). *Geologische Untersuchungen im Südwestlichen Sultandağ (Türkei): Doktora Tezi*, Münster, 105 s. (yayınlanmamış)
- Brennich, G. (1957). Kireli (Beyşehir-Konya) ile Sücüllü (Yalvaç-Isparta) arasındaki lateritler: MTA Derleme, Rap. no: 2686, 72 s. (yayınlanmamış)
- Çetin, H., & Bulur, K. (1979). Yalvaç-Şarkikaraağaç (Isparta) bölgesi demirli boksit yatakları jeoloji Rap. MTA Derleme no: 6594, 96 s. (yayınlanmamış)
- Desprairies, A., & Gutnic, M. (1970). Les grands rouges au sommet du Paleozoique du massif du Sultan Dağ et les niveaux ferralitiques de la couverture Mesozoique: *Bulletin Society Geologie de France*, 7, XII, 505 -514.
- Gülfen, M. (1996). Milas boksit cevherlerinin sülfürik asit çözeltilisindeki çözünürlüğü, Yüksek Lisans Tezi, SAÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Gök, R. (2019). Düşük modüllü metalurjik boksit cevherlerinin zenginleştirme olanaklarının araştırılması, Yüksek Lisans Tezi Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya, 101 s.
- Öztürk, E. M., Öztürk, Z., Acar, Ş., & Ayaroğlu, A. (1981). Şarkikaraağaç (Isparta) ve dolayının jeolojisi. MTA Enstitüsü Jeoloji Dairesi, Ankara.
- Bangian, A. H., Ataei, M., Sayadi, A., & Gholinejad, A. (2012). Optimizing post-mining land use for pit area in open-pit mining using fuzzy decision-making method. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 9, 613–628.
- Betournay, M. C. (2016). Environmental risks of mining: underground mining and its surface effects. Massachusetts Institute of Technology. Massachusetts. <http://web.mit.edu/12.000/www/m2016/finalwebsite/problems/mining.html>
- Blanchette, M. L., & Lund, M. A. (2016). Pit lakes are a global legacy of mining: An integrated approach to achieving sustainable ecosystems and value for communities. *Environmental Sustainability*, 24(1), 28–35.
- Blanchette, M. L., & Lund, M. A. (2017). Turning Hazelwood’s empty coal mine into a lake could help heal mining towns. The Conservation United States INC: <https://theconservation.com/Turning-Hazelwoods-empty-coal-mine-into-a-lake-could-help-heal-mining-towns-74258>.

- Boehrer, B., Yusta, I., Magin, K., & Sánchez España, J. (2016). Quantifying, assessing and removing the extreme gas load from meromictic Guadiana pit lake, Southwest Spain. *The Science of the Total Environment*, 563–564, 468–477.
- Castendyk, D. N., Balistrieri, L. S., Gammons, C., & Tucci, N. (2015). Modeling and management of pit lake water chemistry 2 - case studies. *Applied Geochemistry*, 57, 289–307.
- Castendyk, D. N., & Webster-Brown, J. G. (2007). Sensitivity analyses in pit lake prediction, Martha mine, New Zealand 2: Geochemistry, water–Rock reactions, and surface adsorption. *Chemical Geology*, 244(1–2), 42–55.
- Çağatay A., & Arman, B. (1982). Boksit ve Türkiye’deki boksit yatakları. *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*. Mayıs 1982, 23-32.
- Doyle, G. A., & Runnells, D. D. (1997). Physical limnology of existing pit lakes. *Mining Engineering*, 12(49), 76.
- El-Zeiny, A., & El-Kafrawy, S. (2016). Assessment of water pollution induced by human activities in Burullus Lake using Landsat 8 operational land imager and GIS. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2016.10.002>
- Fabri, E. S., Carneiro, M. A., & Leite, M. G. (2013). Hydrogeochemical characteristics of pit lakes formed in abandon ornamental rocks quarries of Campo Belo Metamorphic Complex, Minas Gerais, Brazil. *Management of Environmental Quality: An International Journal*, 24(1), 82–93.
- Fourie, G. A., & Dohm Jr, G. C. (1992). Open pit planning and design. In H. L. Hartman (Ed.), *SME Mining Engineering Handbook* (2nd edn., Vol. 2, Section 13, p. 1274). Littleton, CO: Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc.
- González, R. M., Ollás, M., Macías, F., Cánovas, C. R., & de Villaranc, R. F. (2018). Hydrological characterization and prediction of flood levels of acidic pit lakes in the Tharsis mines, Iberian Pyrite Belt. *Journal of Hydrology*, 566, 807–817. <https://en-gb.topographic-map.com/>
<https://www.malaysiakini.com/letters/326807>
<https://yebilimleri.mta.gov.tr/>
<https://www.wekeo.eu/>
- Jalloh, A. A. A., & Kororma, D. K. (2021). Effects of bauxite mining on community livelihood and sustainability. *Global Journal of Engineering Science*, 8(4), 1-8. GJES.MS.ID.000695. DOI: 10.33552/GJES.2021.08.000695.
- Kamble, P. H., & Bhosale, S. M. (2019). Environmental Impact of Bauxite Mining: A Review. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET)*, 7(1), 86-90. ISSN: 2321-9653.

- Kelter, D. (1968). Geologische Untersuchungen im Gebiet um Şarkıkaraağaç am Nordende des Beyşehir-Sees (Türkei): Doktora Tezi, Münster. (yayınlanmamış)
- Kırat, G., & Savci, S. (2022). Boksit madeni ve çevre sağlığı üzerine etkileri. *Geosound*, 56(1), 1-14.
- Koçyiğit, A. (1984). Güneybatı Türkiye ve yakın dolayında levha içi yeni tektonik gelişim: Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni, 27(1), 1-16.
- Koschorreck, M., & Tittel, J. (2002). Benthic photosynthesis in an acidic mining lake (pH 2.6). *Limnological Oceanography*, 47, 1197–1201.
- Kusin F. M., Sulong, N. A., Affandi, F. N. A., Molahid, V. L. M., & Jusop, S. (2020). Prospect of abandoned metal mining sites from a hydrogeochemical perspective. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 2678–2695. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10626-1>
- Lahn, E. & Romberg, H. (1939). Konya ve Isparta vilayetlerinde kâin Kireli ve Yalvaç arasındaki demir ve boksit yatakları hakkında raporlar: MTA Derleme no: 1084, 92 s. (yayınlanmamış)
- Lee K. Y., Ho, L. Y., Tan, K. H., Tham, Y. Y., Ling, S. P., Qureshi, A. M., Ponnudurai, T., & Nordin, R. (2017). Environmental and Occupational Health Impact of Bauxite Mining in Malaysia: A Review. *IIUM Medical Journal Malaysia*, 16 (2). <https://doi.org/10.31436/imjm.v16i2.346>.
- McCullough, C. D., & Lund, M. A. (2006). Opportunities for sustainable mining pit lakes in Australia. *Mine Water and the Environment*, 25, 220–226.
- McCullough, D. C., Marchant, G., Unseld, J., Robinson, M., & O’Grady, B. (2012). Pit lakes as evaporative ‘terminal’ sinks: An approach to best available practice mine closure. *Proceedings of International Mine Water Association (IMWA) Symposium 2012* (pp. 167–174). Bunbury, Australia: International Mine Water Association. https://www.imwa.info/docs/imwa_2012/IMWA2012_McCullough_167.pdf
- Mhlongo, S. E., & Dacosta, F. A. (2014). Assessment of the safety status of open excavations and water quality of pit lake at abandoned Nyala Mine in Limpopo Province of South Africa. In S. Sui & Wang (Eds.), *An Interdisciplinary Response to Mine Water Challenges* (pp. 395–399). Xuzhou, China: China University of Mining and Technology Press.
- Mollema, P. N., & Antonellini, M. (2016). Water and (Bio) chemical cycling in gravel pit lakes: A review and outlook. *Earth-Sciences Reviews*, 159, 247–270.
- Monod, O. (1977). *Recherches Géologiques dans le Taurus Occidental au Sud de Beyşehir (Turquie): Doktora Tezi*, Paris, 442 s.

- Mossa, J., & James, L. A. (2013). Impacts of mining on geomorphic systems. In J. F. Shroder (Ed.), *Treatise on Geomorphology* (Vol. 13, pp. 74–95). San Diego, CA: Academic Press
- Muellegger, C., Weilhartner, A., Battin, T. J., & Hofmann, T. (2013). Positive and negative impacts of five Austrian gravel pit lakes on groundwater quality. *The Science of the Total Environment*, 443, 14–23.
- Oggeri, C., Fenoglio, T. M., Godio, A., & Vinai, R. (2019). Overburden management in open pits: Options and limits in large limestone quarries. *International Journal of Mining Science and Technology*, 29, 217–228.
- Periaiah, N., Islam, R., Abdullah, M. F. (2021). Environmental impact assessment for Malaysian bauxite mining industry. *International Journal of the Analytic Hierarchy Process*, 13(1), 1–26. <https://doi.org/10.13033/ijahp.v13i1.851>
- Robles-Arena, V. M., & Candela, L. (2010). Hydrological conceptual model characterisation of an abandoned mine site in semiarid climate. *The Sierra de Cartagena-La Unión (SE Spain)*. *Geologica Acta*, 8, 235–248.
- Rosli, N., Rahman, R. A., Razelan, I. S. M., Ismail, A., & Hasan, M. (2021). Impact of Bauxite Mining on Quality of Life: An Analysis of Road Users. 4th National Conference on Wind & Earthquake Engineering, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 682. 012040. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/682/1/012040>
- Søndergaard, M., Launridsen, T. L., Johansson, L. S., & Jeppesen, E. (2018). Gravel pit lakes in Denmark: Chemical and biological state. *Science of the Total Environment*, 612, 9–17.
- Williams, M. S., Oyedotun, T. D. T., & Simmons, D. A. (2020). Assessment of water quality of lakes used for recreational purposes in abandoned mines of Linden, Guyana. *Geology, Ecology and Landscapes*, 4(4), 269–281. <https://doi.org/10.1080/24749508.2019.1633220>
- Younger, P. L., Banwart, S. A., & Hedin, R. S. (2002). *Mine water. Hydrology, pollution, remediation* (pp. 422). London: Kluwer Academic Publishers.

8. Bölüm

Avgamasya (Şırnak) Asfaltit Ocaklarında Üç Boyutlu (3B) Jeolojik Model Oluşturarak Üretimin Hızlandırılması Çalışmaları

Fatih ÖZGÜL¹
Mehmet ÖZÇELİK²

¹ Yük. Müh., Fides Mühendislik, Emek Mahallesi, Bişkek Caddesi, No: 44/7 6490 Çankaya/Ankara

² Prof. Dr., Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fak., Jeoloji Müh. Bölümü, Isparta, Orcid.org/0000-0003-4511-1946

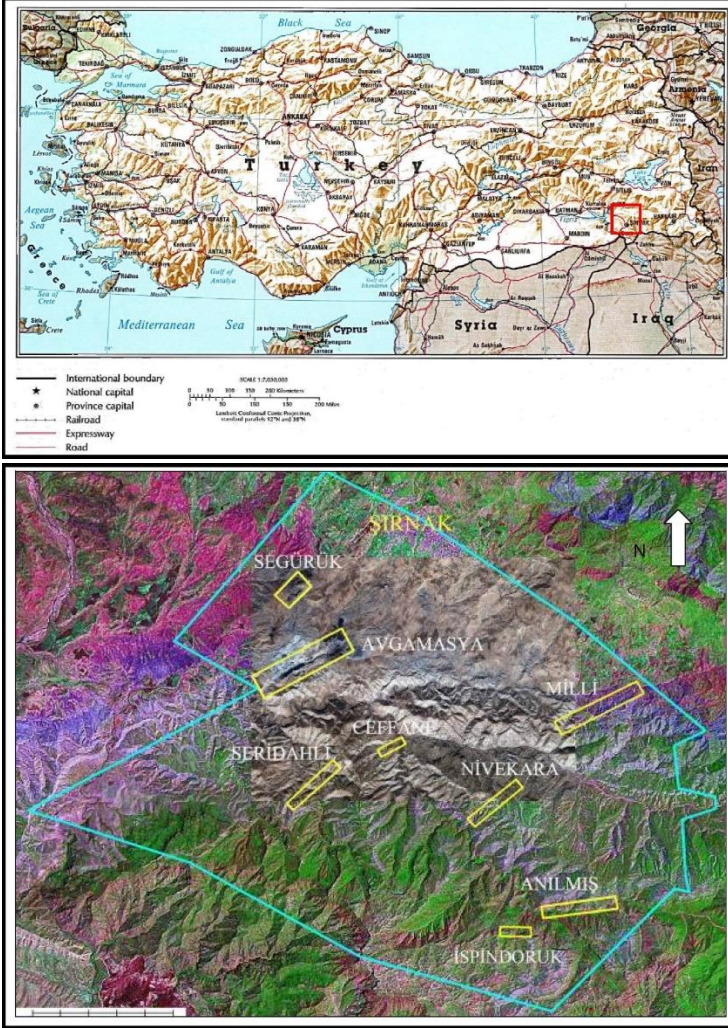
ÖZ

3 boyutlu (3B) jeolojik modellerin geliştirilmesi karmaşık yeraltı ortamlarının kavramsallaştırılmasında kritik öneme sahiptir. Kömür madenciliğinde üretimin artırılması için sahada 3 boyutlu jeolojik modelleme kaçınılmaz bir seçimdir. Geleneksel kömür sahası arama jeolojisi raporlarında, kömür damarları ve bunları çevreleyen kayaların mekansal ifade biçimi 2 boyutlu haritalardır. Bu 2 boyutlu haritalar, kömür sahası arama alanlarının 3 boyutlu jeolojik modellerini oluşturmak için mükemmel veri kaynaklarıdır (White vd., 2013). Ayrıca 3 boyutlu modeller, kritik kararları ve sürdürülebilir madencilik planlamasını desteklemek amacıyla sayısal modellerin geliştirilmesinde ilk adım olabilmektedir (White vd., 2016). Bu çalışma, karmaşık kömür damarlı taban yüzeyinin sınır çizgileri ile tek iç yapıya sahip modelleme bloklarına ayrıştırıldığı blokaj bölmeli 3 boyutlu yeniden yapılandırma yöntemini önermektedir. Bu modelleme blokları ayrı ayrı 3 boyutlu olarak yeniden oluşturulur. Bu arada, bu makale, araştırma alanındaki 3 boyutlu kazı modelini işbirliği içinde yeniden oluşturmak için çok kaynaklı, çok kategorili jeolojik verileri benimseyen yeni bir yöntem ortaya koymaktadır. Her türlü arazi verisinin avantajlarından tam olarak yararlanılır ve dezavantajları telafi edilir. Bu amaçla çalışma alanı olarak seçilen Avgamasya (Şırnak) asfaltit sahasında üretimin artırılması amacıyla 3 boyutlu jeolojik modelleme yapılmıştır. Yukarıda belirtilen yöntemler, Avgamasya asfaltit sahasına ait 33 sondajın 3 boyutlu jeolojik modelleme ile üretimin artması üzerinde iyi bir etkiye sahip olmuştur. Dolayısıyla sahadaki üretimin her aşamasında yapılacak 3 boyutlu yöntemlerle daha geniş uygulama potansiyeli oluşacaktır.

Anahtar Kelimeler: 3 Boyutlu Model, Sayısal Model, Kömür Madenciliği, Avgamasya

GİRİŞ

Avgamasya Asfaltit Madeni Şırnak ilçesinin on kilometre güneybatısında yer almaktadır (Şekil 1-2). Filon yaklaşık 3,5 kilometre boyunca GB-KD yönündedir.



Şekil1-2. Avgamasya Asfaltit Madeninin lokasyonu
Figure 1-2. Location of Avgamasya Asphaltite Mine

Modelleme sürecinin her adımındaki belirsizlik gibi sorunları analiz ederek karmaşık jeolojik kütle modellemeye, maden kaynağı/rezerv tahminine ve maden üretimini arttırabilecek 3 boyutlu modelleme yöntemi geliştirilmiştir (Liang vd., 2024). 3 boyutlu modelleme, maden arama, geliştirme ve ıslah süreciyle birlikte üretimi arttırma sürecinden geçmekte ve bu süreçte 3 boyutlu

model dinamik olarak güncellenebilir ve kademeli olarak geliştirilebilir özelliktedir. Pratik kullanımın sonucuna dayanarak, bu makale tarafından sunulan metodolojinin, mekansal bilgi kalitesi değerlendirmesinin kontrolü altında madencilik verilerini tam olarak kullanarak etkili bir 3 boyutlu model oluşturmak için kullanılabilceği kanıtlanmıştır. Bu çalışmada yapılan 3 boyutlu modelin maden kaynağındaki çalışmaları ekonomik olarak değerlendirmek ve madendeki gelişim sürecin kontrol altında tutulması önemsenmiştir. Ayrıca bu çalışma, faaliyetin çeşitli aşamalarında madencilik verimliliğini artırmak ile birlikte bilimsel kanıt sağlamak için de kullanılabilceğini göstermektedir.

MATERYAL VE YÖNTEM

3 boyutlu programlarının madencilikte kullanıldığı yerler ve kullanım alanları olarak, maden arama etkinlikleri, maden işletme haklarının idaresi, alan seçimi ve dizaynı, çevresel etki değerlendirmesi, imalat, emniyet ve maden sahalarının iyileştirilmesidir.

Şırnak ilinin en önemli yeraltı zenginliği olan asfaltit, petrol kökenli katı bir yakıt olup, yüksek yumuşama noktasına sahip doğal asfalt benzeri bir maddedir. Asfaltit maddelerin yerleşimi petrolün göçüne neden olan; hidrostatik basınç, gaz basıncı, kapilarite, gravitasyon ve sıcaklık gibi etkenlerle ilgili olup bunun sonucu olarak hareket eden sıvı, yarı sıvı durumundaki asfalt, çeşitli kırık ve çatlakları izleyerek yüzeye kadar çıkabilir (Ayaz vd., 2018). Asfaltit içeren bölge Güneydoğu Anadolu'da Şırnak'ın güneyi ile Uludere ile Cizre ile Silopi'nin kuzeyi arasındadır. Şırnak İli'nin yaklaşık 8 km güneybatısında ve Avgamasya Köyü'nün yakınında, asfaltlı bir maddenin en büyük ve şimdiye kadar en iyi araştırılmış, ancak nispeten geç bilinen oluşumu yer almaktadır. Avgamasya damarı Germav Formasyonu içerisinde gelişmiştir. Batıya doğru şekli tek çatlaklı dolgu iken, merkezde ve doğuya doğru düzensiz konik şekle dönüşmektedir. 3500 m uzunluğundaki eksen güneybatı-kuzeydoğu yönünde olup genişliği 15-100 m arasında değişmektedir. Ana yan damarlar birleştiğinde damarın derinlemesine daraldığı görülmektedir. Damar içerisinde büyük tutarlı marn blokları mevcuttur ve bunlar tamamen asfalt kütle ile çevrelenmiştir.

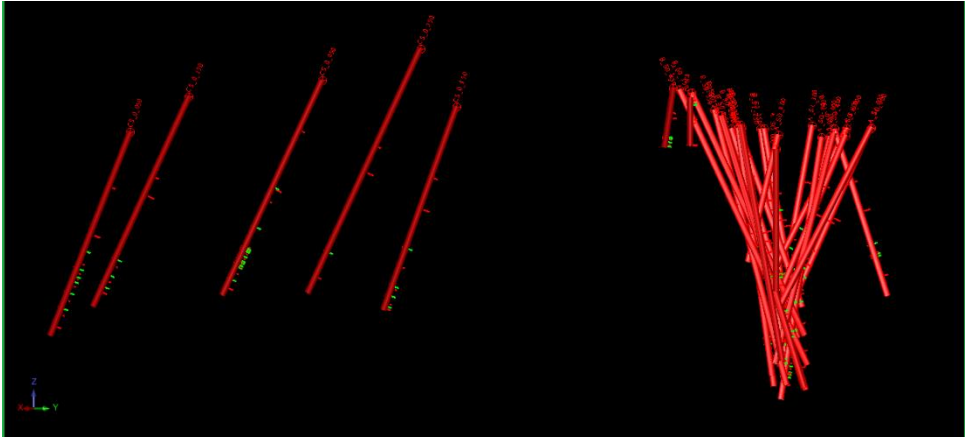
BULGULAR VE TARTIŞMA

3 Boyutlu Modelleme ve Haritalama

3 boyutlu jeolojik blok modellerinin maden ocak tasarımına temel olan veriler genellikle sondajlardan elde edilen bilgilere dayanır. Bunlar kabaca üç gruba ayrılabilir: geometrik, litolojik ve öznitelik verileri. Geometrik veriler, sondajların (UTM ya da mevzii) x, y, z koordinatları, derinliği, eğimi ve çapı gibi geometrisi ile ilgili bilgileri içerir. Litoloji ve öznitelikle ilgili veriler sondajdan

alınan her bir karot örneği ile ilişkili olup sondaj boyunca jeoloji ve kalite değişimini temsil eder (Yasitli ve Unver, 2005).

Bu çalışmada, jeolojik sondaj verilerinden oluşan önemli bir veri kümesinden yararlanarak 3 boyutlu jeolojik örtülü modelleme için derin öğrenmeye dayalı bir yöntem sunulmaktadır. Bu amaçla; Gemcom Surpac programı (<http://www.gemcomsoftware.com>) kullanılarak sondaj verileriyle database oluşturulmuş, sondaj lokasyonlarını gösterme, mevcut sondajların litolojik gösterimi, sahanın blok modelini oluşturma işlemleri gösterilmiştir. Öncelikle, karotlardan elde edilen jeolojik veriler 3 boyutlu modellere dönüştürülmüştür. Jeolojik veriler kullanılarak, Avgamasya Madeni için 3B model ve blok model oluşturulmuştur. Avgamasya Madeninin sondaj ve analiz raporlarına göre; 1, 2 ve 3, 4 No'lu panolardaki asfaltitin kalorifik değerinin 5 ve 6 No'lu panolardan çok daha yüksek (4.200-4.500 Kcal/kg) olmasının beklenebileceğini söylemek yanlış olmaz. 1, 2 ve 3, 4 No'lu panolar için jeolojik rezerv hedefi 8 milyon ton olarak tespit edilmiş ve bu hedef doğrultusunda sondaj planlaması yapılmıştır. Sondaj veritabanı olarak 33 adet sondaj Surpac'ta databaseleri oluşturularak açılımlarına uygun Şekil 3 de görüldüğü gibi işlenmiştir.



Şekil 3. 33 adet sondaj Surpac'ta databaselerinin görünümü
Figure 3. View of the databases of 33 drillings in Surpac

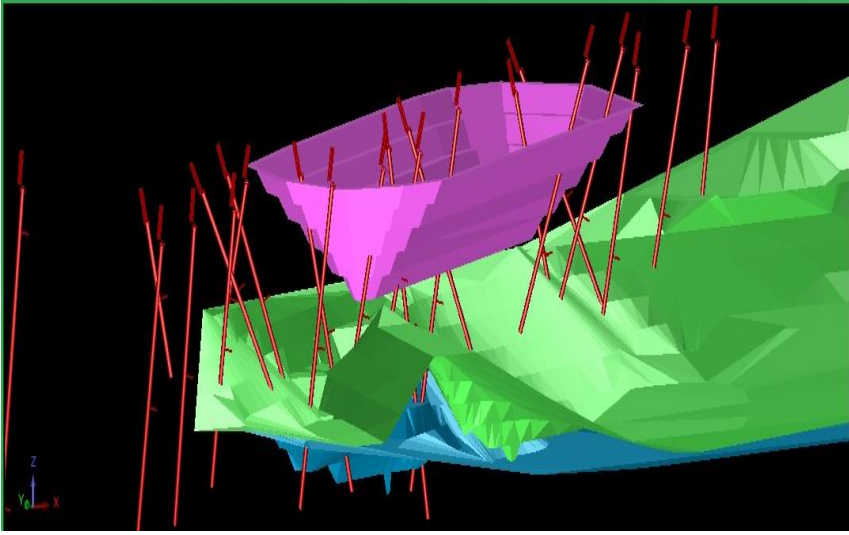
5 ve 6 No'lu panolar için jeolojik model iki bölüme ayrılmıştır; muhtemel ve mümkün jeolojik rezervler. Filon modelinin “muhtemel” bölümü, mevcut ocak tabanından 480 m kotuna kadar indirilerek 250 m derinliğe kadar modellenmiştir. Bu bölüm, sık sondaj aralığı ve yeterli jeolojik veri ve filonun devamı konularındaki güvenilirlik seviyesinden dolayı muhtemel olarak sınıflandırılmıştır. Filon modelinin, 480 m kotunun altından 380 m kotuna kadar

(dikey olarak 100 m) olan bölümü, gerçekleştirilen sondajlara olan mesafe ve yukarı kısımlardan daha az olan jeolojik bilgi seviyesinden dolayı mümkün olarak sınıflandırılmıştır. Avcımadıya Madeni, 5 ve 6 No'lu panolar için geliştirilmiş olan bu modellerden elde edilen sonuçlara göre;

Muhtemel rezerv (pasa karışimsız) 12.246.000 ton, 3.682 Kcal/kg üst ısı değerinde; Mümkün rezerv (pasa karışimsız) 4.937.000 ton, 3.488 Kcal/kg üst ısı değerinde; olarak hesaplanmıştır.

3 Boyutlu Modelin Sürekli Güncellenmesi

3 boyutlu jeolojik modellemenin başlangıcını takiben, jeolojiyi, bilgisayar bilimini, istatistikleri ve coğrafi bilgi teknolojilerini bütünleştiren bu disiplinler arası teknoloji, çeşitli yer bilimlerini alanlarında geniş bir ilgi kazanmıştır. Geleneksel 3B modelleme yöntemleri ağırlıklı olarak ağ modellerinin oluşturulması ve çoklu kesitlerde jeolojik yüzeyler oluşturmak için profillerin manuel olarak çizilmesi yoluyla jeolojik yapıların görsel olarak temsil edilmesine dayanır. Bu yaklaşım zaman alıcıdır, güncellenmesi zordur ve büyük ölçüde modelleyicinin uzmanlığına bağlıdır ve değişken model kalitesine yol açar. Açık 3 boyutlu modellemenin bir alternatifi, jeolojik yapının mekansal yapısını dikkate almadan 3 boyutlu verilerin ölçeğinin küçültülmesini içerir. Ancak bu yöntem, jeolojik profillerin uygulanması ve veri işleme sırasında ek hatalara neden olabilir. A-SO-400, A-SO-600, A-SO-700, A-SO-900, B-SO-350, B-SO-450, B-SO-550, B-SO-750-B ve B-SO-950 sondajların kömür birimini 664 kodu ile 530 kodları arasında kesmiştir (Şekil 4). Dolayısıyla bir önceki yapmış olduğumuz şev dizaynında kömür birimi kesilmemiş kömür birimini kesebilmek için 630 kodunda başlayan yeni bir dizayn yapılmıştır (Şekil 5). Buna göre;

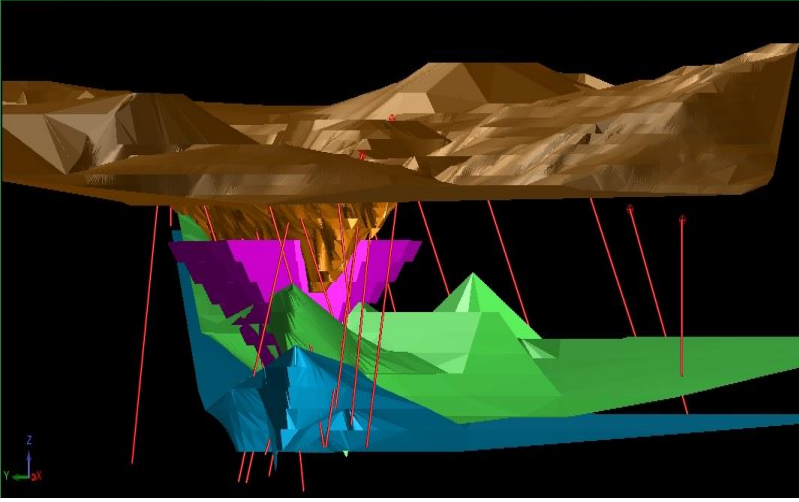


Şekil 4. 680 Taban koduna göre yapılan şev dizaynı (Yeşil alan kömür tavanını, mavi alan kömür tabanını temsil etmektedir)

Figure 4. Slope design made according to 680 base code (Green area represents the coal top, Blue area represents the coal bottom)

Şekil 5 de yapılan yeni modelleme ile;

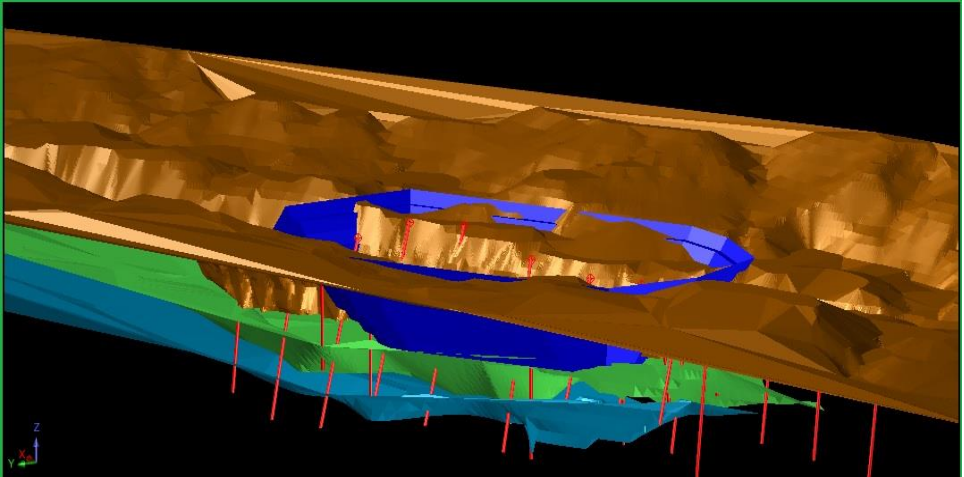
Yaklaşık 630 kodunda yaklaşık 59340 m² lik alanda alt şev alanında yapılan kazı ile kömür tavanına giriş yapılacağı anlaşılmıştır. Yaklaşık 630 taban kotundan başlayarak kuzey-güney yönünde açılarak, 55 derece genel şev açılı, Basamak yüksekliği 20 m, Basamak Genişliği 10 m olacak şekilde yaklaşık 8 kademe şeklinde hazırlanan şev geometrisine istinaden yeniden hazırlanan Şev dizaynı sonucunda;



Şekil 5. 630 Taban koduna 5 kademe ile yapılan dizaynda topografyaya ulaşılmamıştır

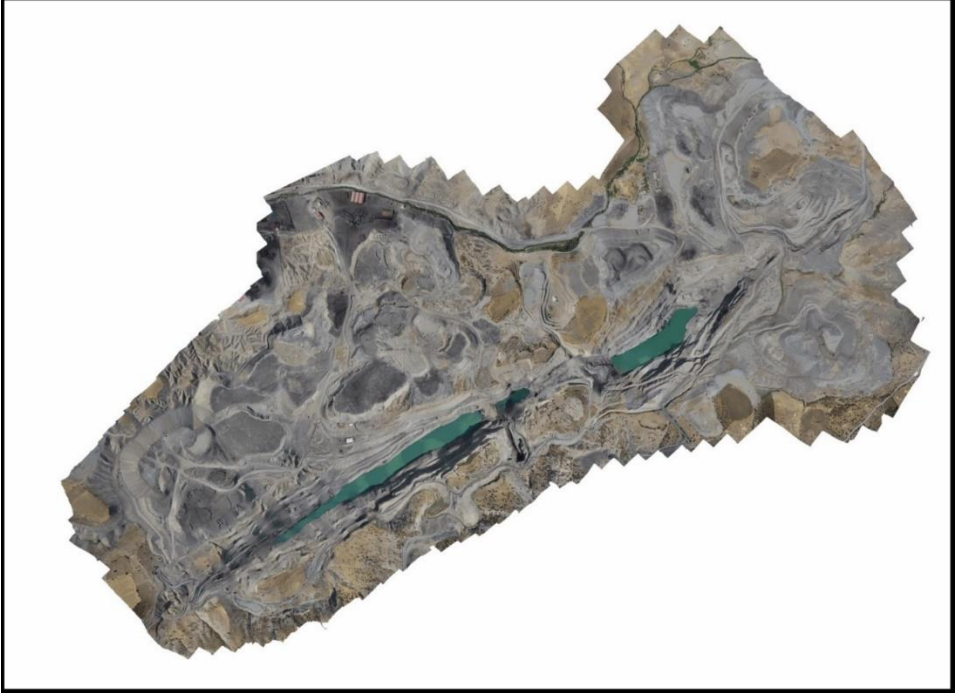
Figure 5. The topography could not be achieved in the design made with 5 levels for base code 630

Yaklaşık 820 kodunda yaklaşık 336.000 m² lik alanda çalışılması gerektiği gözlemlenmiştir. Ancak söz konusu alanın tamamında dekapaj yoktur. Tabanda bulunan kömürün konumlanması vadiye paralel şekildedir (Şekil 6). Avgamasya asfaltit ocaklarına ait 3 Boyutlu Model ise Şekil 7 de görülmektedir.



Şekil 6. Şev dizaynının son hali

Figure 6. Final version of the slope design



Şekil 7. Avgamasya asfaltit ocaklarında 3 Boyutlu (3B) model
Figure 7. 3D Model of Avgamasya Asphaltite Pits

SONUÇLAR

Günümüzde 3 boyutlu jeolojik blok modellerinin üretimi, bilgisayar işlem gücü, dijital modelleme, görselleştirme, analiz ve dağıtım mekanizmalarındaki gelişmeler nedeniyle maden üretim çalışmalarında önem kazanmaktadır. 3 boyutlu maden üretim modelleri, jeolojik araştırmalarla üretilen jeolojik haritaların mantıksal ardılları olarak görülebilir. 3B modellerin oluşturulması, daha önce izole edilmiş ve farklı birçok veri kümesinin görselleştirme ve analiz için tek bir 3B uzamsal çerçevede birleştirilmesini içerir. Modelleme süreci, kullanıcının veri kalitesini değerlendirmesine ve modelin kısıtlanmasında bunların kullanımına ilişkin kararlar almasına olanak tanır. Mevcut tüm veri kaynakları tek bir mekansal çerçevede değerlendirilerek mümkün olan en iyi jeolojik 3 boyutlu modelin oluşturulması sağlanır. Bu tür modellerin birçok uygulamalı kullanımı vardır. Ancak burada da gösterildiği gibi, Avgamasya (Şırnak) asfaltit sahasında üretimin artırılması amacıyla 3 boyutlu jeolojik modelleme yapılmıştır. Yukarıda belirtilen yöntemler, Avgamasya asfaltit sahasına ait 33 sondajın 3 boyutlu jeolojik modelleme ile üretimin artması üzerinde iyi bir etkiye sahip olmuştur. Yapılan çalışmalar sonucunda; projede açık ocak çalışılması durumunda 830 kotu ile 630 arasında çalışılmalıdır, 55 °

genel Şev açılı, 10 m basamak genişliğine 20 mt basamak yüksekliğine sahip, 7 basamaklı Şev dizaynından oluşan sahada toplam kazı miktarı yaklaşık 2.598.432,25 m³ lük kazı söz konusudur. Konuma dayalı her türlü veriyi toplama, depolama, işleme ve görüntüleme görevlerini yerine getiren bilgisayar programları madencilikte genel olarak harita uygulamalarında kullanılırken, madencilik için özel olarak tasarlanan Surpac gibi 3 boyutlu modelleme programları katı model oluşturma, rezerv hesabı, tenör, açık işletme dizaynı, üretim planlama ve raporlama uygulamaları açısından daha iŐlevseldir. Bu uygulamaların yaygınlaŐmasıyla beraber madencilik projeleri daha kısa sürede, daha kesin sonuçlarla ve daha düşük maliyetlerle gerçekleŐebilecektir. Dolayısıyla sahadaki üretimin her aşamasında yapılacak 3 boyutlu yöntemlerle daha geniş uygulama potansiyeli oluşacaktır.

KAYNAKLAR

- Ayaz, M.E., Polat, M.A., Şengüler, İ., Yıldırım, N. (2018). Türkiye'nin yeraltı zenginlikleri potansiyeli ve Şırnak ilindeki durum, İ. Baz, D. Alp, Ö. Bilgin (Ed.ler), Eğitim Yayınevi Konya, 486 s., ISBN: 978-605-7557-33-9
- Liang, L., Li, T. and Ma, C. (2024). Research on 3D geological modeling method based on deep neural networks for drilling data, Applied Sciences, 14(1), 423. <https://doi.org/10.3390/app14010423>
- Surpac Tutorials, (erişim tarihi: 5/05/2017), <http://www.gemcomsoftware.com>
- White, P.A., Tschritter, C. ve Davidson, P. (2013). Development of 3D models of sedimentary lithologies and piezometric levels to understand groundwater and surface water flows, lower Wairau Plain, Marlborough, New Zealand: Geological Society of America workshop on three-dimensional geological mapping, Denver, Colorado, October 26.
- White, P.A., Tschritter, C., and Davidson, P. (2016). Geological controls on groundwater flow to spring-fed streams as determined by three-dimensional models of sedimentary lithologies and piezometric levels, lower Wairau Plain, Marlborough, New Zealand: Journal of Hydrology (New Zealand), 55(1), 25–43.
- Yasitli N.E., Unver B. (2005). 3D numerical modeling of longwall mining with top-coal caving, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 42, 219-235.

9. Bölüm

Alçı Harcının Fiziksel, Mekanik ve Termal Performansına Su İtici ve Hava Sürükleyici Katkıların Etkileri

Metin DAVRAZ¹

¹ Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü.
metindavraz@isparta.edu.tr ORCID No: 0000-0002-6069-7802

ÖZET

Alçı suyun etkisiyle katılaşıp sertleştiğinden, hidrolik bağlayıcılar sınıfında yeralan bir yapı malzemesidir. Alçı diğer bağlayıcılara göre hafiftir, çabuk priz yapar ve ısı iletkenliği düşüktür. Alçı üretimi sırasında atmosfere karbondioksit salınımı olmaz. Ancak alçı ve alçı ürünleri nemden ve sudan etkilenir, mekanik özellikleri zayıflar. Bu nedenle suyla temas eden bölgelerde ve sürekli nemli ortamlarda alçı ürünleri kullanılamaz.

Bu çalışmada kapiler su emmesi azaltılmış, ısı yalıtım performansı artırılmış ve mekanik özellikleri yeterli hafif alçı harçların elde edilebilirliği araştırılmıştır. Alçının su ve nemden etkilenmesini azaltmak amacıyla çinko stearat, toz silikon ve sıvı formda PVA kullanılmıştır. Toz katkıların kullanım oranı alçı kütlesinin %1-3'ü, PVA'nın %5-15'dir. Tüm karışımlarda su/alçı oranı (0.6) sabit tutulmuştur. Kütlece %8.5 oranında kullanılan PVA katkısı kartonpiyer alçısının kapiler su emmesini 5 kata varan oranda azaltmış, 28 günde eğilme dayanımını 2.1 kat, basınç dayanımını 1.3 kat artırmıştır. PVA katkılı alçı harcına kütlece %6.5 oranında köpük ilavesiyle yoğunluk 2.32 kat azalmış ve ısı iletkenlik %65 oranında iyileşmiştir. Sonuç olarak bu çalışma köpüklü alçının nispeten suya ve neme direnci artırılmış, yanmaz ve yeterli mekanik özelliklere sahip bir ısı yalıtım malzemesi olarak kullanılabileceğini göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Hafif alçı, yoğunluk, kapiler su emme, eğilme-basınç dayanımı, ısı iletkenlik

GİRİŞ

Alçının Tarihçesi

Alçı, Yunanca “gypsos” (alçı) kelimesinden türetilmiştir. Paris'in Montmartre bölgesinde bulunan jips ocaklarından çıkarılan alçıtaşından üretilen alçı, 2 Eylül 1666 tarihinde Londra'da yaşanan yangın sonrası Paris'te sıva olarak kullanımı zorunlu hale getirilmiş olup “Paris'in sıvası” olarak adlandırılmıştır (https://www.wikiwand.com/tr/Alçı_taş). Bundan 20 – 30 milyon yıl önce, bugünkü Anadolu yarımadası oluşurken denizlerin çekilmesiyle milyonlarca ton alçıtaşı rezervleri oluşmuştur.

Alçı tarihte ilk defa 8800 yıl önce Çatalhöyük'te kullanılmaya başlanmıştır. Yapılan arkeolojik kazılarda evlerde çatı ve zemin kısımlarında, milattan sonraki dönemde ise Anadolu, Mezopotamya, Osmanlılar ve Selçuklular özellikle Roma ve Yunan imparatorluklarında kullanıldığı fark edilmiştir. İnşaat malzemesi olarak Romalılar tarafından kullanılan alçı kolay kullanımı ve mimari ihtiyacı karşılamış aynı zamanda sanatla birleşip iç -dış mekânları süslemiş ve korniş ile sütunlarda kullanılmıştır (https://tr.wikipedia.org/wiki/Alçı_taş, https://tr.wikipedia.org/wiki/Büyük_Londra_Yangını). Osmanlı döneminden kalan yapılarda alçı uygulamalarına rastlanmaktadır. 1930 yıllarda alçı üretimine başlanmış ve gelişen teknoloji ile birlikte alçı ürünleri önemli yapı malzemeleri haline gelmiştir. Günümüzde ise alçıtaşı üretimi 100 milyon tonun üzerindedir (<https://www.ekoyapidergisi.org/alcı-binlerce-yildir-insanlığın-hizmetinde>). Alçının ısı ve sese karşı yalıtım, nem düzenleme, işlenme, uygulama ve onarım kolaylığı sağlaması ve ayrıca yangına dayanıklılığı ile ekonomikliği alçı kullanımı her geçen gün artmaktadır (<https://www.gpcmuhendislik.com/alcı/>).

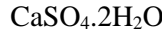
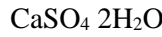
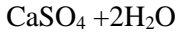
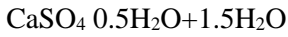
Alçının Tanımı

Alçıtaşı, doğada “anhidrit” ve “jips” minerali olarak bulunur. Alçıtaşının ısıtılınca bünyesinde yarım mol su kalır ve öğütüldüğünde alçı elde edilir. Alçı suyla karıştırıldığında katılaşıp bağlayıcı özellikteki bir yapı malzemesi haline dönüşür (http://www.alcider.org.tr/docs/alcı_tanitim.pdf). Alçıtaşının kimyasal formülü $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ olup kalsiyum sülfat dihidrattan oluşan sülfat mineralidir. Alçıtaşı doğada anhidrit, jips, bassanit, ipek jipsi albatr ve selenit şeklinde bulunur. En çok bulunan mineral ise jipsdir. Alçıtaşından farklı sıcaklıktaki ısı işlemler sonucunda iki tür alçı elde edilir (https://tr.wikipedia.org/wiki/Alçı_taş). Erken priz yapan alçı, alçıtaşının kırılması, öğütülmesi ve 120 derecede kalsinasyon işlemleri sonrası tekrar öğütülmesi ile üretilir. Bu tür alçı genel olarak model, kalıp, tavan süsleri yapısında kullanılır ve su ile karıştırıldığında 15-30 dk sonrasında katılaşıp. Geç

katılaşılan alçı ise alçıtaşının öğütülmesi sonrasında 450 derecede kalsine edilerek kristal suyun tamamen uzaklaştırılmasıyla elde edilir. Bu alçı su ile karıştırıldığında katılma süresi birkaç günü alabilir ve çok dayanıklı bir kütle elde edilir. Mohs sertlik skalasına göre jipsin sertliği 2'dir (Bilgin, 2019; <https://www.hurriyet.com.tr/mahmure/jips-tasi-nedir-ve-ne-ise-yarar-jips-alcitasi-nasil-anlasilir-ve-kullanilir-jips-tasi-faydalari-ve-ozellikleri-41861114>).

Alçı Bağlayıcıların Özellikleri

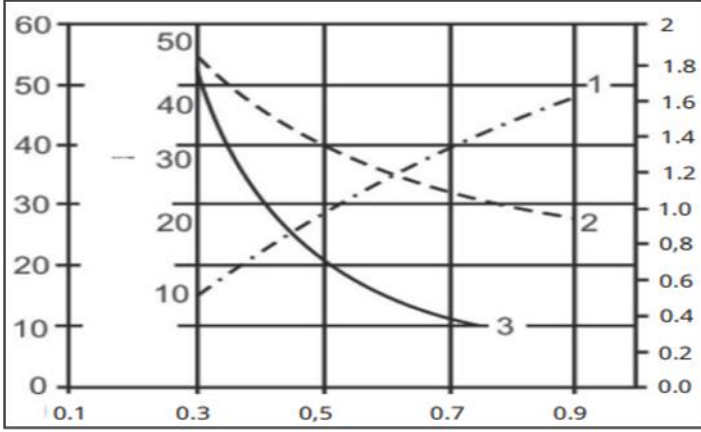
Alçının suyla reaksiyon sonrası sertleşmesi, ekzotermik bir reaksiyondur. Hidratasyonun temel mekanizması aşağıdaki gibidir (Ferronskaya, 2004).



İnşaat alçısı için su tüketimi %50-70, yüksek mukavemetli alçı için %30-40, anhidritler için %30-35'tir. Alçı bağlayıcılar priz süresine bağlı olarak hızlı, normal ve yavaş priz gibi gruplara ayrılır. Hızlı ve normal sertleşen bağlayıcılar için ilk sertleşme süresi 2-6 dakikadan önce ve nihai sertleşme sırasıyla 15 ve 30 dakikadan sonra gerçekleşir. Üçüncü gruptaki alçı bağlayıcılar için 20 dakika veya daha fazla bir başlangıç sertleşme süresi vardır. İnşaat alçısında sertleşme süreci yaklaşık 2 saat sonra tamamlanır ve basınç dayanımı 2 - 7 MPa arasında değişir. Yüksek mukavemetli alçı için, basınç mukavemeti normalde 7 - 25 MPa arasındadır (Nwaubani vd., 2011).

Alçı ürünlerde priz ve sertleşme sürelerini düzenlemek için geciktirici ve hızlandırıcı katkıları kullanılır. Hızlandırıcı katkıları, yapay alçı kullanıldığında yaygındır. Su / alçı oranı, ürün özelliklerini etkileyen en önemli faktördür (Şekil 1) (Nwaubani vd., 2011).

Suyun buharlaşması nedeniyle oluşan gözenekler çoğunlukla kılcaldır. Bu nedenle, döküm alçısı nispeten yüksek bir su emme oranına sahiptir. Su/alçı oranını azaltmak için akışkanlaştırıcılar kullanılabilir. Polikarboksi eterler, alçı parçacıkları üzerinde önemli bir sterik etki sağladıkları için en etkili akışkanlaştırıcıdır (Nwaubani vd., 2011). Alçı ürünlerinin düşük su direnci, alçı dihidratın yüksek çözünürlüğünden kaynaklanır. Kireç ve çimento alçının su direncini arttırmak için kullanılabilir.



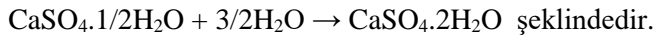
Şekil 1: Temel alçı özelliklerinin su-alçı oranı üzerindeki bağımlılıkları: Gözeneklilik (1), ortalama yoğunluk (2), basınç dayanımı (3) (Lund-Nielsen, 2010).

Alçının Katılaşma Mekanizması

Alçıtaşının bünyesinden uzaklaştırılan suyun tekrar verilerek alçının alçıtaşı yapısına dönüştürülmesine, katılaşma veya priz denir. Alçı konusunda ilk bilimsel araştırmalar Le Chatelier tarafından yapılmış olup, alçının katılaşmasını, ardışık üç aşama ile açıklamaktadır:

- I. Hidratasyon (kimyasal reaksiyon),
- II. Kristalleşme (fiziksel olgu),
- III. Katılaşma (mekanik olgu).

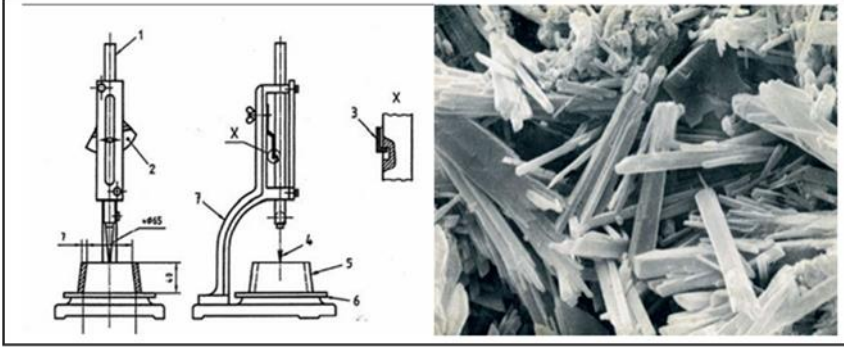
Hidratasyon reaksiyonu, alçının suda çözünmesi ile başlar. Reaksiyonun kimyasal gösterimi



Yarım hidrat alçı suda alçıtaşından ve anhidritlerden daha fazla suda çözünür (Şekil 1). Sıcaklık yükseldikçe çözünürlük azalır ve bu fenomen diğer inorganik bağlayıcılarda olmayan bir özelliktir.

Alçı 90° C'den sonra sertleşmez. Yarım hidrat alçının suda çözünmesinden sonra suya Ca^{+2} ve SO_4^{-2} iyonları eklenir. Hidratlaşma eğiliminde olan bu iyonlar yarım ve çift hidratın çözünme derecesinin üzerinde bir çözelti oluşturur. Oluşan çözeltide yoğunluk nedeniyle $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ çökeler. Çökelen bu malzeme iğne şeklindeki jips kristalleridir (Şekil 2). Alçının su ile teması sonrası katılaşmaya başlama zamanı priz başlangıcı olarak tanımlanır ve bu süre kullanıcılar için önemlidir. Priz başlangıç süresi vikat iğnesi ile ölçülür. Bu iğnenin alçı hamurunun 3-5 mm dibine ulaşmadığı süre priz başlangıcı, hiç batmadığı an ise

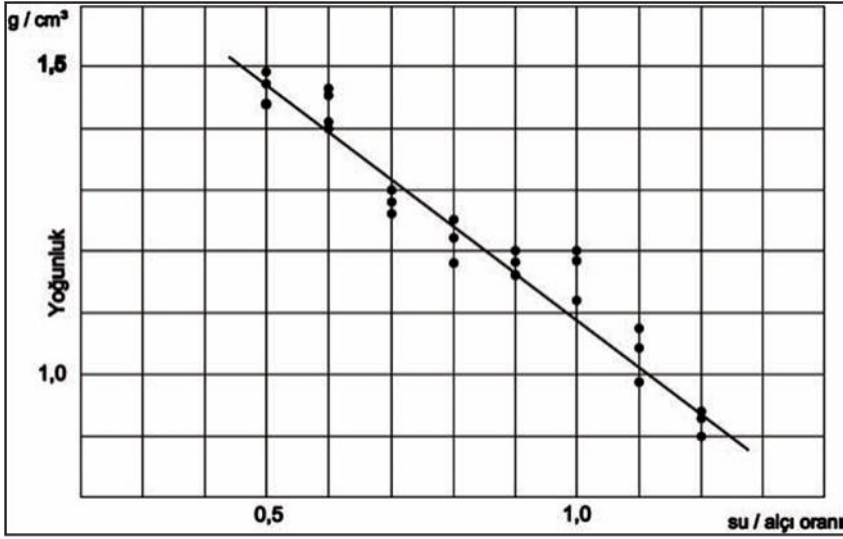
priz sonu olarak kabul edilir. Alçının işlenme süresi, akıcılığın azalmaya başladığı zaman olup priz başlama süresinden birkaç dakika önce biter (Gürdal, 2010).



Şekil 2: Tipik bir Vikat cihazı (solda) ve büyüyen alçı kristalleri (sağda) (Gürdal, 2010)

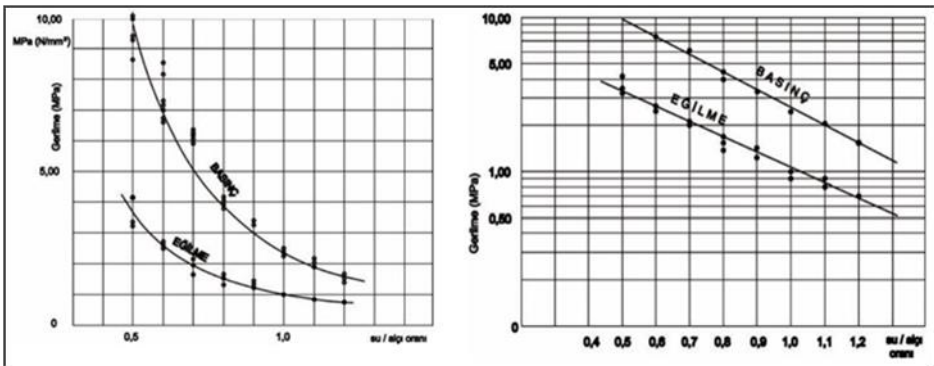
Sertleşmiş Alçının Özellikleri

Su/alçı oranına göre sertleşmiş alçının fiziksel özellikleri değişmektedir. Normal koşullarda, su/alçı oranı %50 oranından daha az olursa karıştırılamayacak kadar kıvamlı, %100 oranından fazla olursa priz almayacak kadar sıvı olur. Alçının daha düşük su/alçı oranları (%40 ve %50) ile işlenebilir hale getirmek ve priz süresini uzatmak için priz geciktiriciler kullanılır (Gürdal, 2010). Su/alçı oranının artması, katılaştırmış alçının bünyesinde boşlukların artmasına; bu da yoğunluğun azalmasına neden olur. Su/alçı oranı azaldıkça durum tam tersidir (Şekil 3). Su/alçı oranı %50 olduğunda yoğunluğu $\sim 1450 \text{ kg/m}^3$ iken, oran %120 olduğunda bu değer 950 kg/m^3 'e kadar düşer (Dubuission, 1950).



Şekil 3: Su/alçı oranına bağlı olarak yoğunluğun değişimi (Dubuission, 1950)

Boşluk oranlarının değişimi, mekanik dayanımları da düşürür. Katkısız kartonpiyer alçısı ile yapılan deneylerde, % 50 su/alçı oranında basınç dayanımı 10 MPa, %90 oranında ise 3 MPa bulunmuştur (Şekil 4). Benzer biçimde eğilme dayanımı da 3.6 MPa'dan 1.2 MPa'ya kadar düşebilir. Bu değerler kuru durumdaki alçıya aittir. Su teması sonrası, dayanımlar ~1/3 varan oranda azalabilir. Dolayısıyla, su ile temas eden ortamlarda alçı kullanımı sakıncalıdır (Dubuission, 1950).



Şekil 4: Eğilme ve basınç dayanımlarının logaritmik değişiminin grafik üzerinde gösterilmesi (Dubuission, 1950)

Boşluklu yapısı nedeniyle alçının ısı direnci diğer bağlayıcılara göre daha düşüktür. TS EN 13279- 1 standardındaki ısı iletkenlik değerleri Tablo 1’de sunulmuştur (Dubuission, 1950).

Tablo 1: Sertleşmiş alçı sıva ve bağlayıcıların ısı iletkenlik değerleri (TS EN 13279-1)

Yoğunluk (kg/m ³)	Isıl İletkenlik ($\lambda_{23, 50}$)
600	0.18
700	0.22
800	0.26
900	0.30
1000	0.34
1100	0.39
1200	0.43
1300	0.47
1400	0.51
1500	0.56

Yapı malzemelerinin yangınlık açısından değerlendirilmesinde alçı “A1 sınıfı yanmaz” bir malzeme olarak gruplandırılır. Bir yangında alçı, gözeneklerindeki nem ve bünyesindeki kristal suyu uzaklaştırmak için ısı enerjisinin büyük bir bölümünü absorbe eder. Yapı alçıları ve alçı levhaların yangına direnç süreleri 120 dakika civarındadır (http://www.alcider.org.tr/docs/alci_tanitim.pdf).

Yapı sektöründe alçı inşaat, saten perdah, kartonpiyer, perlitli sıva, derz dolgu, makine sıva, yapıştırma alçıları ve duvar dolgu elemanı ve iki yüzeyi karton kaplı alçı plaka gibi ürünlerde kullanılır. Perlitli alçı makine alçısı olarak en uygun alçı türüdür. Makine sıva alçısı, brüt beton, tuğla, bimsblok ve gazbeton gibi duvar elemanları üzerine doğrudan uygulanabilir (<https://inyapi.com/alci-nedir-ve-cesitleri-nelerdir>). Macun kıvamında olan saten alçı boya öncesinde yapılan son kat işlemi olarak kullanılır ve ince yapısı sayesinde pürüzsüz bir yüzey oluşturur. Bu alçı kartonpiyer, niş, söve, göbek aplik ve heykel gibi dekoratif amaçlarla kullanılır. Özel ve ince tane dağılımına sahip kartonpiyer alçısı, yüksek dayanım ve yüzey sertliğine sahip olup kartonpiyer yapıştırmasında ve yapımında kullanılır (<https://inyapi.com/alci-nedir-ve-cesitleri-nelerdir>).

Alçı bina yükünü hafifletir. Büyük bölümü deprem sıklıkla deprem riski altında olan ülkemizde bu özellik önemli bir avantajdır. Alternatif duvar malzemelerine göre alçı levhalar yapı yününü 4 kat hafifletir [8]. Alçının kolay uygulanabilirliği, işlenebilirliği ve alternatif malzemelere kıyasla daha çabuk priz

yapması inşaat süresini kısaltır. Bu olgu inşaat ekonomisi için oldukça önemli bir katkıdır. Ülkemiz alçıtaşı rezervleri açısından zengindir (http://www.alcider.org.tr/docs/alci_tanitim.pdf).

Alçı 90-120 °C'de, kireç 900 °C'de ve çimento 1450 °C'de üretilir. Alçımın üretiminde kireç üretiminde kullanılan enerjinin 1/2'si, çimento üretiminde kullanılan enerjinin ise 1/5'i kullanılır (http://www.alcider.org.tr/docs/alci_tanitim.pdf).

Alçı çevre dostu bir malzemedir. Hammaddesi olan alçıtaşı doğal bir mineraldir ve geri dönüştürülebilir bir malzemedir. Son yıllarda kullanılan dış cephe kuru duvar sistemlerinde kullanılan alçı levhalar, yüksek yangın dayanımı, düşük karbon salımı ve hızlı imalatı nedeniyle inşaat sektöründe vazgeçilmez bir malzeme olmuştur (<https://www.kalkinmakutuphanesi.gov.tr/assets/upload/dosyalar/alcitasi-uretim-tesisi-fizibilite-raporu.pdf>).

Gömülü enerji, bir ürünün ham madencilikten bertarafa kadar toplam yaşam döngüsü boyunca harcanan birikmiş enerjidir. Bir yapı malzemesinin gömülü enerjisinin tahmini, çıkarıldığı andan kullanım ortamına kadar harcanan enerjidir (BEDB, 2009). İçerdiği enerji ile birlikte tahmin edilen karbon ayak izi değeri, bir ürünün yaşam döngüsü boyunca neden olduğu birikmiş sera gazları ile ilgilidir. Alçı sıvanın somutlaşmış enerjisi yaklaşık 1.8 MJ/kg ve karbon ayak izi, 1 kg ürün başına 0.12 kg CO₂'dir (Hammond and Jones, 2006). Alçımın üretimi esnasında bünyesinden sera gazı açığa çıkarmaması da en büyük avantajlarından. Bu nedenle alçı aynı zamanda yeşil bir yapı malzemesidir.

İklim değişikliği tehdidi ile yüzleşen dünyamız ve ülkemiz açısından, alçıdan yüksek performanslı ısı yalıtım ürünlerinin geliştirilmesi büyük yararlar sağlayabilir. Bu çalışmada kapiler su emmesi azaltılmış, ısı yalıtım performansı artırılmış ve mekanik özellikleri yeterli hafif alçı ürünlerin elde edilebilirliğine odaklanılmıştır.

MATERYAL VE YÖNTEM

Materyal

Çalışmada bağlayıcı olarak β alçısı (kartonpiyer alçısı) kullanılmıştır. Alçımın kapiler etkilerle su emmesinin azaltılması için farklı oranlarda 4 farklı tipte su itici katkı maddesi kullanılmıştır.. Bu katkılar çinko stearat, toz silikon, ve polivinil alkol (sıvı PVA) dür.

Toz formundaki katkılar alçı kütlelerinin %1, %2 ve %3'ü oranında kullanılmıştır. PVA oranı, toz katkılar ile yaklaşık maliyetleri göz önünde bulundurularak alçı kütlelerinin %5, %10 ve %15'idir. İşlenebilirlik de göz önünde bulundurularak, tüm karışımlarda su/alçı oranı 0.6 seçilmiştir. Ayrıca çalışmada yoğunluğu azaltmak ve ısı yalıtım özelliklerini geliştirmek amacıyla alçı

harçlarına farklı oranlarda köpük (hava sürükleyici) ilave edilmiştir. Köpük üretiminde enzim bazlı köpük ajanı kullanılmıştır.

Yöntem

Alçı karışımların priz süresi TS EN 196-3 standardına göre Vikat testi ile belirlenmiştir. Hazırlanan alçı harçları 40x40x160 mm çelik prizmatik kalıplara dökülmüş, 28 gün sonrasında 105 °C de değişmez kütleye ulaşınca kadar kurutulmuş, boyutları 1/100 mm hassasiyetli elektronik kumpas ile ölçülmüştür. Numunelerin kütleleri 1/100 g hassasiyetli elektronik terazi ile tartılmış ve kütle/yoğunluk eşitliği ile kuru yoğunlukları kg/m³ birimi cinsinden TS EN 1015-10 standardına göre hesaplanmıştır.

Prizma numuneleri 7 ve 28 günde oda sıcaklığında bekletilmiş ve 105°C’de etüvde kurutulduktan sonra eğilme (f_{cf}) ve basınç dayanımları (f_c) TS EN 1015-11 standardına göre belirlenmiştir. Eğilme dayanımları Eşitlik 1, basınç dayanımları Eşitlik 2’ye göre hesaplanmıştır (Şekil 5).



Şekil 5: Alçı numunelerin üç nokta eğilme (solda) ve basınç dayanımı (sağda) deneyleri

$$f_{cf} = 1.5 \times \frac{F \cdot L}{b \cdot h^2} \quad (1)$$

Burada; F, kuvvet, N; L, mesnetler arası mesafe, mm; b, numunenin eni, mm; h, numunenin yüksekliği, mm’dir.

$$f_c = \frac{F}{A} \quad (2)$$

Burada; F, kuvvet, N; A, basınç uygulanan alan, mm² dir.

Alçı numunelerin kapiler su emme deneyleri TS EN 1015-18 standardına göre yürütülmüş ve kapiler su emme katsayısı (c) Eşitlik 3'e göre hesaplanmıştır.

$$c = \frac{(M_{90} - M_{10})}{\sqrt{t_{90}}} \quad (3)$$

Burada; M₉₀, suya maruz numunenin 90 ncı dakikadaki kütlesi, g; M₁₀, suya maruz numunenin 10 ncu dakikadaki kütlesi, g; ; t₉₀, numunenin suyla temas süresi, dk'dır.

Hafif alçı numunelerin termal özelliklerini belirlemek amacıyla 60 mm çapında ve 25 mm yüksekliğinde silindirik numuneler hazırlanmıştır. 28 gün havada kürlen, 105 °C'de etüvde kurutulan ve 23°C /%50 bağıl nemde iklim kabininde dengeye getirilen numunelerin ısı iletkenlikleri Lasercomp Fox 50 cihazı ile TS EN 12667 standardına göre ölçülmüştür. Ölçümlerde alt ve üst plaka sıcaklık farkı (ΔT) 10°C dir.

ARAŞTIRMA BULGULARI

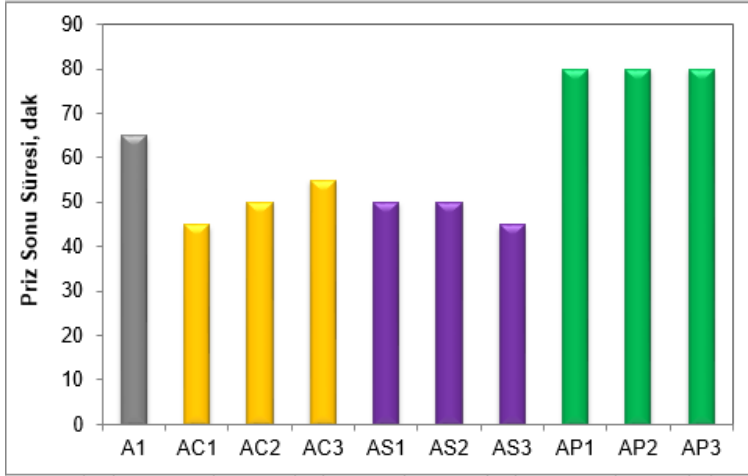
Kartonpiyer alçısının yoğunluğu gaz piknometresi ile ölçülmüş ve 10 ölçüm ortalaması 2.68 g/cm³ olarak belirlenmiştir. Priz süresi tayini deneyi Vikat cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Ölçümler 5'er dak aralıklarla yapılmıştır.

Katkısız alçı harcı (A), alçı harcı ve 3 farklı oranda çinko stearat (AC1, AC2 ve AC3), alçı harcı ve 3 farklı oranda toz silikon (AS1, AS2 ve AS3), alçı harcı ve 3 farklı oranda PVA (AP1, AP2 ve AP3) tasarımları Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2: Alçı harç numunelerinin bileşenleri (kütlece %)

Numune	Alçı	Su	CS	TS	PVA
A	67.50	37.50	0.00	0.00	0.00
AC1	62.11	37.27	0.62	0.00	0.00
AC2	61.73	37.04	1.24	0.00	0.00
AC3	61.35	36.81	1.84	0.00	0.00
AS1	62.11	37.27	0.00	0.62	0.00
AS2	61.73	37.04	0.00	1.24	0.00
AS3	61.35	36.81	0.00	1.84	0.00
AP1	60.61	36.36	0.00	0.00	3.03
AP2	58.82	35.29	0.00	0.00	5.88
AP3	57.14	34.29	0.00	0.00	8.57

Vikat testi bulgularına göre, en kısa priz süreleri (45 dak) alçı harcına %1 oranında CS ilave edilen AC1 numunesinde, %3 oranında TS ilave edilen AS3 numunesinde gerçekleştirmiştir (Şekil 6).



Şekil 6: Alçı numunelerinin priz sonu süreleri

7 ve 28 gün kür sürelerini tamamlayan prizma numunelerin kuru durumda yoğunlukları belirlendikten sonra kapiler su emme deneyleri yürütülmüştür. Aynı numuneler 105°C’de tekrar kurutulmuş, eğilme ve basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır. Bulgular Tablo 3 ve 4’de ve Şekil 7-9’de verilmiştir.

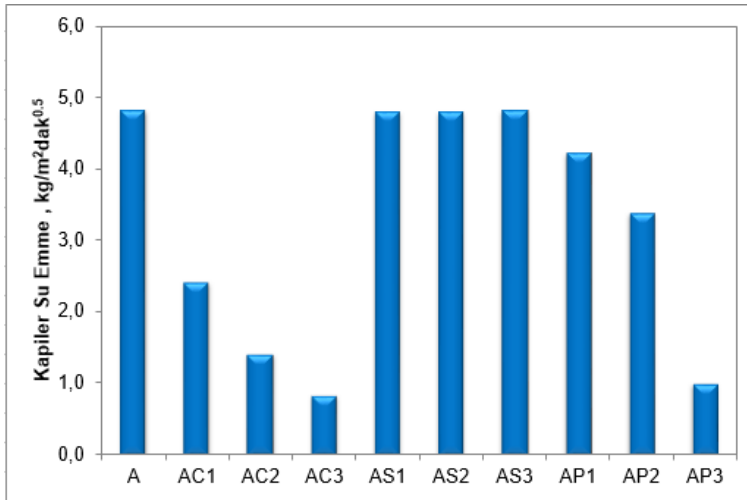
Tablo 3: 7 günde alçı numunelerinin yoğunluk, kapiler su emme ve eğilme-basınç dayanımı bulguları

Numune	D_{7d} (kg/m^3)	f_{c-7d} (MPa)	f_{cf-7d} (MPa)	C_{7d} ($\text{kg/m}^2.\text{dak}^{0.5}$)
A	1140	10.46	3.52	5.19
AC1	1044	6.74	2.52	1.80
AC2	1014	4.77	1.43	1.31
AC3	955	2.56	1.42	0.60
AS1	1143	12.37	5.43	5.34
AS2	1130	12.19	5.19	4.48
AS3	1111	10.59	5.97	5.49
AP1	1030	7.75	3.79	4.99
AP2	951	8.39	3.02	4.55
AP3	982	12.59	6.36	1.44

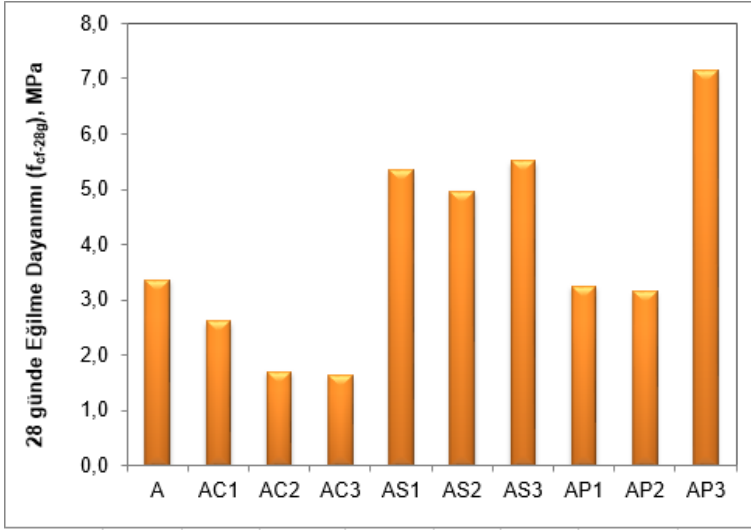
Tablo 4: 28 günde alçı numunelerinin yoğunluk, kapiler su emme ve eğilme-basınç dayanımı bulguları

Numune	D _{28d} (kg/m ³)	f _{c-28d} (MPa)	f _{cf-28d} (MPa)	C _{28d} (kg/m ² .dak ^{0.5})
A	1104	9.50	3.36	4.83
AC1	1094	8.19	2.62	2.42
AC2	1030	4.62	1.71	1.40
AC3	1030	3.70	1.64	0.83
AS1	1154	12.00	5.34	4.80
AS2	1136	11.70	4.96	4.80
AS3	1150	11.96	5.52	4.82
AP1	960	7.54	3.24	4.23
AP2	911	8.35	3.16	3.39
AP3	1011	12.48	7.15	1.00

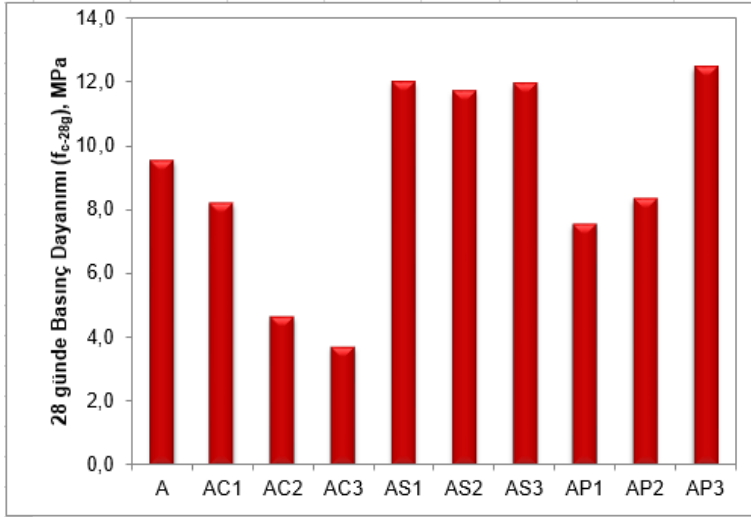
28 günde en yüksek ve en düşük kapiler su emme değerlerini sırasıyla A ve AC3 numuneleri sergilemiştir. Bu bulgu %1.84 oranında kullanılan çinko stearat numunesinin kapiler su emmeyi kontrol numunesine göre 5 kattan fazla azalttığını ortaya koymuştur. AP3 numunesi 28 günde eğilme ve basınç dayanımında en yüksek dayanım değerleri sergilemiştir. Kontrol numunesine göre AP3 numunesinde eğilme dayanımı 2.1 kat ve basınç dayanımı 1.3 kat artmıştır. Bu numunede kapiler su emme katsayısı ise ~ 5 kat azalmıştır.



Şekil 7: Alçı numunelerinin kapiler su emme katsayıları



Şekil 8: Alçı numunelerinin eğilme dayanımları



Şekil 9: Alçı numunelerinin basınç dayanımları

Eğilme-basınç dayanımı ve kapiler su emme özellikleri açısından en uygun tasarım AP3 olarak belirlenmiştir. AP3 karışımına köpük jeneratöründen üretilen $\sim 100 \text{ kg/m}^3$ yoğunlukta köpük kütlece 3 farklı oranda ilave edilmiştir. Köpüklü alçı harcı bileşenleri Tablo 5’de verilmiştir.

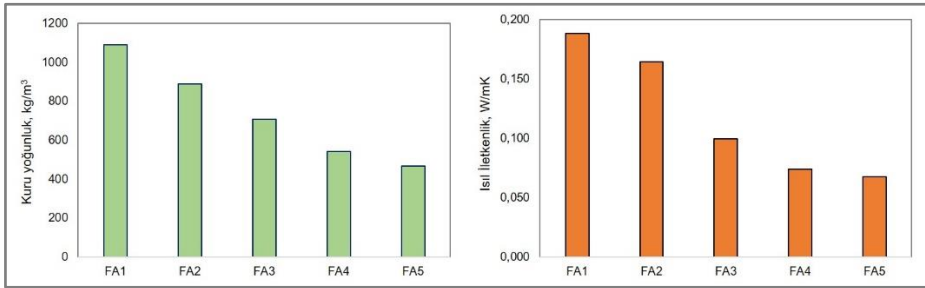
Tablo 5: Köpüklü alçı numunelerinin bileşenleri (kütlece %)

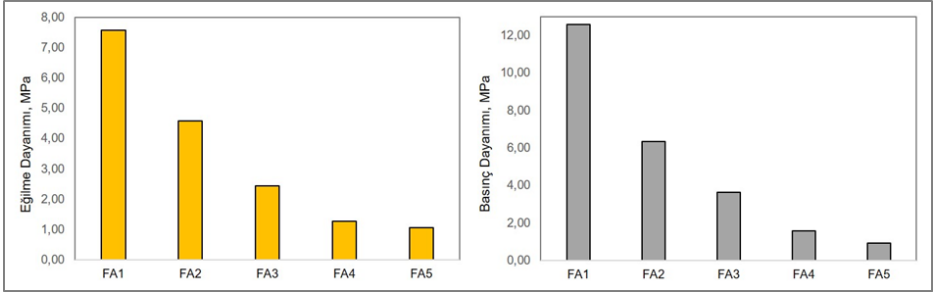
Malzeme	FA1	FA2	FA3	FA4
Alçı	57.14	56.16	55.22	53.4
Su	34.19	33.70	33.13	32.1
PVA	8.57	8.43	8.28	8.0
Köpük	0	1.71	3.37	6.5

4 farklı yoğunlukta elde edilen hafif alçı harç numuneleri 28gün havada kürlenmiş, 105°C de hava dolaşımli etüvde kurutulmuş, yoğunluk, kapiler su emme, eğilme-basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır. Bulgular Tablo 6 ve Şekil 10-12’de sunulmuştur.

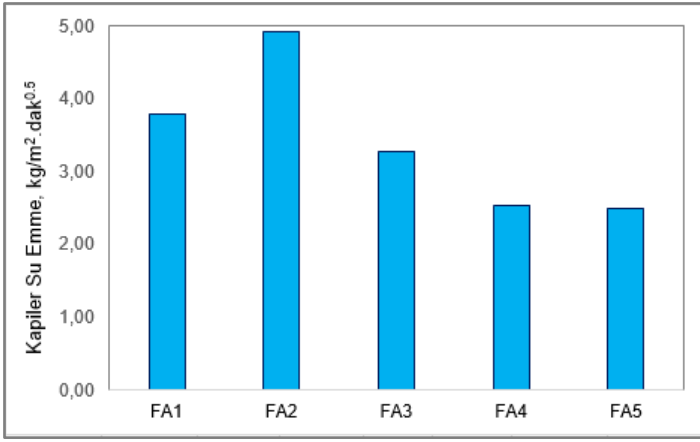
Tablo 6: Köpüklü alçı numunelerin fiziksel, termal ve mekanik özellikleri

Numune	D (kg/m ³)	$\lambda_{23,50}$ (W/mK)	f_{c-28g} (MPa)	f_{c-28g} (MPa)	c (kg/m ² dak ^{0.5})
FA1	1089	0.188	7.59	12.59	3.80
FA2	889	0.164	4.59	6.34	4.91
FA3	706	0.099	2.44	3.64	3.27
FA4	541	0.074	1.27	1.56	2.54
FA5	468	0.067	1.07	0.98	2.49

**Şekil 10:** Köpüklü alçı numunelerinin kuru yoğunluk (solda) ve ısı iletkenlik (sağda) değerleri



Şekil 11. Köpüklü alçı numunelerinin eğilme (solda) ve basınç (sağda) dayanımları



Şekil 12. Köpüklü alçı numunelerinin kapiler su emme katsayıları

Köpük ilave edilen PVA katkılı alçı numunelerinde, köpük miktarı arttıkça yoğunluk ve buna bağlı olarak ısıl iletkenlik ve kapiler su emme değerleri azalmıştır. FA5 numunesinde yoğunluk 2.32 kat azalırken ısıl iletkenlik % 65 ve kapiler su emme % 35 oranında iyileşmiştir. Bununla birlikte eğilme dayanımı 7 kat ve basınç dayanımı ise 12 kat düşmüştür.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Alçı suya ilgisi olan bir yapı malzemesidir. Aynı zamanda diğer bağlayıcılara göre ısıl iletkenliği düşüktür. Bu çalışmada düşük ısı yalıtım performansı yüksek aynı zamanda kapiler su emmesi düşük alçı ürünlerin elde edilebilirliği araştırılmıştır. Alçı harçlarında su itici katkı malzemesi olarak çinko stearat, toz silikon ve PVA kullanılmıştır. Çinko stearat katkısı kapiler su emmeyi önemli oranda azaltmakla birlikte mekanik özellikleri olumsuz etkilemiştir. Toz silikon katkısının kapiler su emmeyi azaltmada hiçbir etkisi olmadığı ve alçı bağlayıcıları ile su itici katkı maddesi olarak kullanımının uygun olmadığı belirlenmiştir. PVA

ise mekanik özelliklere önemli katkı sağlarken kapiler su emme de önemli oranda azalma sağlamıştır.

Köpük kullanımı ile yoğunluğu 468 kg/m^3 değerine düşürülen alçı numunesinde, ısı iletkenlik değeri ($\lambda_{23,50}$) 0.0674 W/mK dir. Bu değer ısı yalıtım malzemeleri için tanımlanmış olan 0.065 W/mK üst sınır değerine oldukça yakındır. Bir başka söylemle yoğunluğu $\sim 470 \text{ kg/m}^3$ köpüklü alçı ısı yalıtım malzemesi olarak iç mekânlarda kullanılabilir.

KAYNAKLAR

- BEDB (2009). Building Energy Data Book, 1.6.6 ABD'deki İç Duvar Tertibatlarının Bedenlenmiş Enerjisi, s. 1–37.
- Bilgin, Ö. (2019). Balıkesir Bölgesine ait jips (alçıtaşı) örneğinin karakteristik özellikleri ve kullanım alanları. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, (15), 55-60.
- Dubuisson, A. (1950). “Etude sur les Plâtres”, Revue des Matériaux de Construction, No.418: pp. 228-232; No.419: pp.259- 265; No.420: pp.282-287; No.421: pp.313-316
- Ferronskaya, A.V. (2004). Alçı Malzemeler ve Ürünler: Üretim ve Uygulama. ACB Yayıncılık, Moskova. 488 s. (Rusça).
- Gürdal, E. (2010). Bir Yapı Malzemesi Olarak ALÇI. Restorasyon ve Konservasyon Çalışmaları Dergisi, (4), 37-43.
- Hammond, G.P. and Jones, C.I. (2006). Somutlaşmış Enerji ve Karbon Ayak İzi Veritabanı. Makine Mühendisliği Bölümü, Bath Üniversitesi, Birleşik Krallık. Şu adreste mevcuttur: <http://www.daireselecology.com/embodied-energy-and-carbon-footprint-database.html>.
- Lund-Nielsen, H., (2010). European long-term trends in recycled gypsum usage. Global GypsumMagazine, November, pp. 24–28
- Nwaubani, S., Dvorkin, L., Dvorkin, O. (2011). Construction Materials (Materials Science and Technologies), Mineral Binders. http://www.alcider.org.tr/docs/alci_tanitim.pdf
- <https://inyapi.com/alci-nedir-ve-cesitleri-nelerdir/>
- [https://tr.wikipedia.org/wiki/Alçı taş](https://tr.wikipedia.org/wiki/Alçı_taş)
- [https://tr.wikipedia.org/wiki/Büyük Londra Yangını](https://tr.wikipedia.org/wiki/Büyük_Londra_Yangını)
- <https://www.ekoyapidergisi.org/alci-binlerce-yildir-insanligin-hizmetinde>
- <https://www.gpcmuhendislik.com/alci/>
- <https://www.hurriyet.com.tr/mahmure/jips-tasi-nedir-ve-ne-ise-yarar-jips-alci-tasi-nasil-anlasilir-ve-kullanilir-jips-tasi-faydolari-ve-ozellikleri-41861114>
- <https://www.kalkinmakutuphanesi.gov.tr/assets/upload/dosyalar/alcitasi-uretim-tesisi-fizibilite-raporu.pdf>
- [https://www.wikiwand.com/tr/Alçı taş](https://www.wikiwand.com/tr/Alçı_taş)

10. Bölüm

Elektrikli Araçlar ve Şarj İstasyonları

Ahmet ALBAYRAK¹

Metin KAYNAKLI²

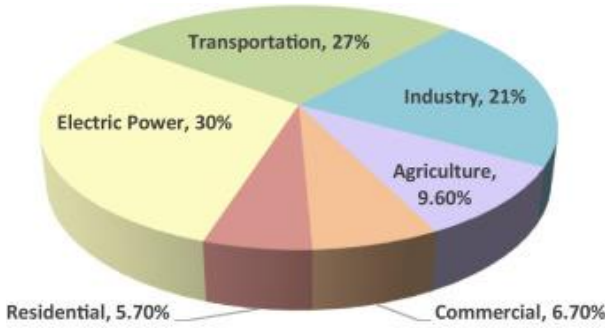
¹ Dr. Öğr. Üyesi Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, ahmetalbayrak@duzce.edu.tr

² Öğr. Gör. , Bitlis Eren Üniversitesi, mkaynakli@beu.edu.tr

1. GİRİŞ

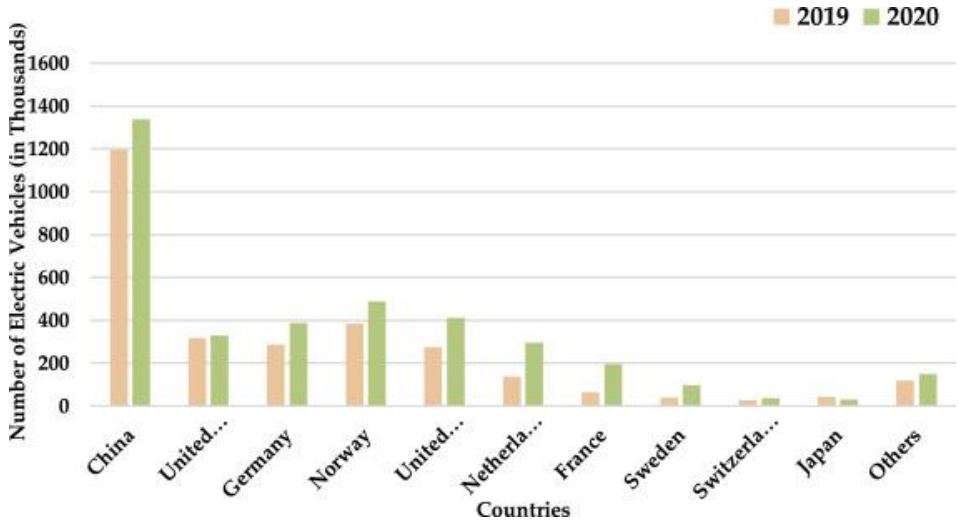
Ortalama dünya sıcaklığının yükselmesi ve fosil yakıtların sürekli azalması gibi zararlı çevresel değişiklikler, dünyayı karbondioksit emisyonunu en aza indirme konusunda arayışlara sevk etmiştir. Ulaşım sistemlerinde çevre dostu, sürdürülebilir elektrikli araç (EA) alternatifi, hızla içten yanmalı motorla çalışan araçların yerini almaktadır. Bu bağlamda, fosil yakıtlara olan bağımlılığın azalması ve yanıcı gaz emisyonunun sıfır olması nedeniyle elektrikli araçların popülaritesi çok hızlı yayılmaktadır. Uluslararası Enerji Ajansı 2030 yılına kadar dünya genelinde elektrikli araç sayısının 145 milyonun üzerinde olacağını tahmin etmektedir (Rajendran et al., 2021; Cengiz, Ç. 2024).

Uluslararası Enerji Ajansı (IEA), küresel CO₂ emisyonlarının 2035 yılına kadar 37,0 gigatonu aşacağını bildirmiştir. CO₂ emisyonları ulaşım, sanayi, binalar, elektrik, ısı üretimi ve tarımdan elde edilen çıktılar gibi birçok ekonomik alanda üretilmektedir. Elektrik ve ısı üretimi gibi üretim sektöründen kaynaklanan CO₂ emisyonu, Şekil 1'de gösterildiği gibi toplam CO₂ emisyonunun %41,2'sini oluşturmaktadır. Dünyanın dört bir yanındaki birçok ülkede 2019'a kıyasla yollardaki elektrikli araçların sayısında bir artış görüldüğünden, elektrikli araçlara yönelik küresel baskı ivme kazanmaktadır. Bunun sebebi, Şekil 2'de gösterildiği gibi, müşteriler arasında daha fazla çevre bilincine atfedilebilir (Mahmud et al., 2023; Yap et al., 2022).



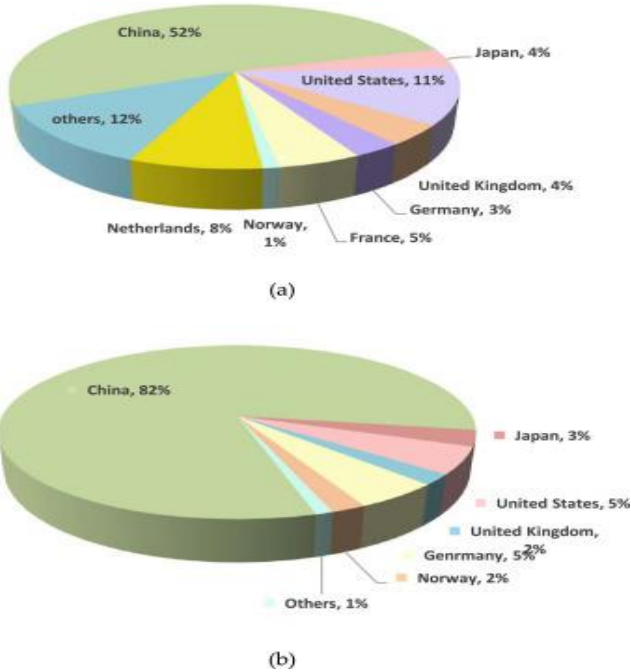
Şekil 1. 2020 yılında sektörlere göre sera gazı emisyonu (Khalid et al., 2022)

Şekil 2, 2020'de 2019'a kıyasla Avrupa ve Çin'in yollarda en fazla elektrikli araç sayısına sahip olduğunu göstermektedir. Şekil 3, çeşitli ülkelerde halka açık yavaş şarj istasyonlarının ve hızlı şarj istasyonlarının yüzdesini göstermektedir.



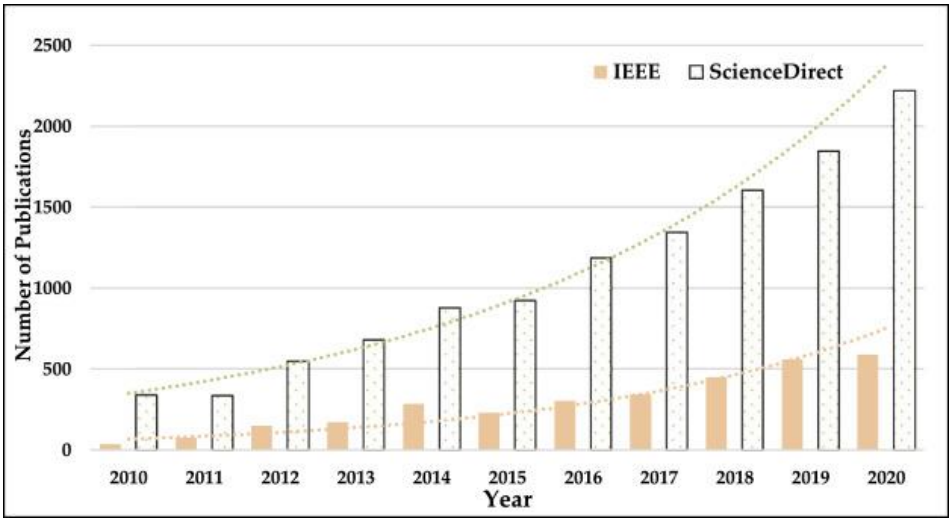
Şekil 2. 2019 ve 2020 yıllarında yollardaki elektrikli araç sayısı (x1000) (Rajendran et al., 2021).

Çin'de kurulu hem yavaş hem de hızlı şarj istasyonları diğer ülkelere göre daha yüksektir (yavaş şarj istasyonları – %51 ve DC hızlı şarj istasyonları – %82).



Şekil 3. Kamuya açık şarj istasyonları (a). Yavaş şarj istasyonları (b). Hızlı şarj istasyonları. (Hemavathi & Shinisha, 2022)

Teknolojinin ilerlemesiyle birlikte, özellikle EA (Elektrikli Araç) şarj alanındaki araştırma ilgisi, şarj istasyonu teknolojisine aşamalı olarak etki etmiştir. Bu durum 2020 yılındaki yayın sayısı 2019 yılına göre 1,5 kat daha fazla olması şeklinde gözlemlenmektedir. Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü (IEEE) 2020 yılında toplam 590 dergi makalesi rapor ederken, Science Direct aynı yıl 2219 makale bildirmiştir. Bu alana uyarlanabilir olan istatistiksel tahminlere dayalı yöntemleri içeren yapılmış çalışmaların araştırma sayısı her geçen gün artmaktadır (Cengiz, 2019; Aydoğdu and Cengiz, 2015). Ayrıca IEEE ve Science Direct'te EA şarj istasyonları alanındaki araştırmaların büyümesinde istikrarlı bir artış Şekil 4'te gösterilmektedir.



Şekil 4. IEEE ve Science Direct'te 2010'dan 2020'ye kadar EA şarj istasyonlarına ilişkin dergi yayınlarının sayısı (Khalid et al., 2022).

EA şarjına ilişkin patentler ve silisyum karbür (SiC) ve galyum nitrür (GaN) güç yarı iletken malzemelerine dayalı şarj istasyonları gibi yeni ortaya çıkan teknolojilerdir. Bu araştırma alanında şarj istasyonlarının özel tasarım parametreleri önemli ölçüde incelenmiştir. Sbordone ve ark. enerji depolama sistemine ve farklı güç dönüştürücülere sahip EA şarj istasyonlarının tasarım ve uygulama sonuçlarını sunmaktadır. Buchroithner ve ark. volan enerji depolamalı şarj istasyonları hakkında uzun uzadıya tartışmışlardır. Ek olarak, İnci ve ark.'nın bir inceleme makalesinde EA şarj istasyonları için yalnızca güç elektroniği dönüştürücülerini ve güç kontrol cihazlarını vurgularken, Tu ve ark. EA şarj istasyonları için güç dönüştürücüler hakkında teknolojik bir genel bakış sunmuşlardır. (Bharathidasan et al., 2022; He et al., 2023)

Araştırma topluluğu tarafından şarj topolojilerinde gerçekleştirilen çeşitli ilerlemeler, birçok inceleme makalesinde özetlenmiştir. EA'lar için Seviye 2 şarj teknolojilerinin mevcut durumunu ve bunların dağıtımını, özelliklerini ve açık literatürde yayınlanan standartlarını ve bunların akıllı şebekelerle etkileşimini ve olası güvenlik önlemlerini incelemektedir (Cengiz and Mamis, 2015). Dünya çapındaki solar FV-EA şarj sistemlerinin kapsamlı bir incelemesini sunmaktadır. Yazarlar, elektrikli araçların şarj davranışını, şarj cihazı çalışma modlarını ve şarj cihazı kullanıcılarının coğrafi konumunu belirlemek için analitik yöntemler önermektedir (Yap et al., 2022). EA'ların hızlı şarj edilmesine yönelik en son teknolojiye odaklanmakta ve bunun uygulanmasındaki zorlukları ve engelleri ele almak için yapılan araştırmaların kapsamlı açıklamalarını da içermektedir. Makalede iletken ve endüktif şarj yöntemleri karşılaştırıldı, şarj standartları özetlendi ve literatürde açıklanan hızlı şarj istasyonları için topolojiler tartışıldı. En son teknolojiye sahip EA şarj altyapısını incelediler ve mevcut ve gelecekteki EA yakıt ikmali ihtiyaçlarını desteklemek için gerekli olacak son derece hızlı değişen teknolojiye odaklandılar. Ayrıca yazarlar aşırı hızlı şarj istasyonlarının tasarım hususlarını sunmuş ve son derece hızlı değişim sağlamaya uygun tipik güç elektroniği dönüştürücü topolojilerini gözden geçirmişlerdir. Bataryalı EA'lar (BEA'lar) için mevcut kablosuz ve kablolu şarj teknolojilerine kapsamlı bir genel bakış [11]'de sunulmaktadır. BEA'ların bataryaların şebekeye nasıl bağlandığına bağlı olarak iki tür kablolu şarj teknolojisi vardır: AC (Alternatif akım) ve DC (Doğru akım). Daha sonra BEA'lar için kablosuz şarj teknolojisinin konfigürasyonları ve ortak topolojileri ayrıntılı olarak tartışılmaktadır. Batarya değiştirme istasyonunun (BDİ) nasıl çalıştığını, hangi altyapının gerekli olduğunu, tekniklerin nasıl uygulandığını, aşırı şarj istasyonlarının ne gibi faydalar sağladığını ve BSS ile ilgili zorlukları tartışmıştır. Son olarak elektrikli araçlara yönelik bir S34X akıllı değişim istasyonu önerilmekte ve kritik bir hamle olarak BDİ'ye yönelik bir çalışma tartışılmaktadır (Naseri et al., 2023). Ayrıca elektrikli araçların mevcut durumu ve uygulaması, şarj altyapıları ve akü şarj cihazları tartışılmaktadır. Şarj sistemleri araç üstü veya araç üstü olarak sınıflandırılabilir ve tek yönlü veya çift yönlü güç akışı sağlar. Tek yönlü şarj, ara bağlantıyı basitleştirir ve donanım gereksinimlerini azaltır. Şebeke enerjisi, çift yönlü şarj kullanılarak akülere geri enjekte edilebilir. Ağırlık, yer ve maliyet nedeniyle bu sorunlar, şarj cihazının elektrikli sürücüyü dahil edilmesiyle önenebilir. Batarya teknolojisinin gözden geçirilmesi, şarj istasyonları ve güç dönüştürücüler için mevcut standartları ve batarya teknolojisinin etkisini inceledi. Mevcut şarj cihazları üzerinde yapılan bir araştırma, güç faktörü ve düşük verimlilik gibi bazı dezavantajları tespit etti. Asenkron motorlar veya sabit miktatsız motorlar kullanan EA akü şarj sistemleri için ana topolojileri

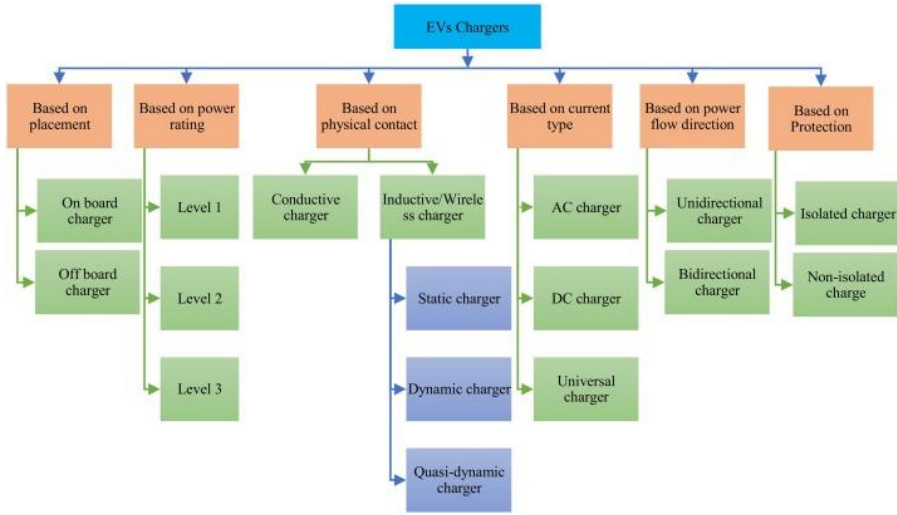
incelemekte ve donanım yeniden yapılandırması gerektirmeyen veya neredeyse hiç yeniden yapılandırma gerektirmeyen türlere odaklanmaktadır (Shrivastava et al., 2023). Çekiş sistemi bileşenleri, ağırlık, boyut ve maliyet kısıtlamalarından kaçınmak için yerleşik entegre şarj cihazlarında kullanılır. Entegre yerleşik EA şarj cihazları tarafından kullanılan topolojilerin bir incelemesi. Entegre bileşenlere göre, yerleşik entegre şarj cihazları arasında üç topoloji ayırt edilebilir. Birinci tipte, yerleşik şarj cihazına tek bir ünite olarak yalnızca dönüştürücü entegre edilmiştir. Izgara tarafı için de bir filtre indüktörü gereklidir. İkinci tip yerleşik şarj cihazı, hem dönüştürücüyü hem de motor sargılarını tek bir cihazda birleştiren anahtarlamalı relüktans motorunu temel alır. Ayrıca, çift yönlü gemideki yüklerin derinlemesine bir incelemesini ve en son teknolojiye sahip araştırmasını sunmuşlardır. Mimarileri ve konfigürasyonları, akıllı operasyonları, endüstri standartlarını ve önemli bileşenleri gözden geçirerek mevcut duruma ilişkin bir genel bakış sağlanır. Bu çalışmada, iki kademeli ve tek kademeli yapıları içeren, gelecek vaat eden çift yönlü araç üstü yük topolojileri detaylı bir şekilde anlatılmaktadır. Araç içi ve araç dışı şarj cihazlarının birçok farklı teknolojisinin bulunması ve fiyatların, boyutların, ağırlıkların, güç değerlerinin vb. değişken olması, uygun şarj sisteminin seçimini daha da zorlaştırmaktadır (Austmann, 2021).

2. ELEKTRİKLİ ARAÇLARIN BATARYA ŞARJ ALTYAPISI

Bilindiği üzere şarjlı bataryalar geçmişte yoğun olarak aydınlatma amaçlı cihazlarda kullanılırken günümüzde artık bataryalar EA için bir enerji kaynağıdır (Cengiz and Cengiz, 2018; Cengiz and Mamiş, 2015). Elektrikli bir aracın şarj cihazı, ev tipi bir prizden yüksek güçlü bir kaynağa kadar değişebilir. Bu, ABD'de Otomotiv Mühendisleri Derneği'nin (SAE) kurulmasına yol açtı. SAE, EA'lara ilişkin özel kılavuzlar geliştirmiştir. Şarj cihazlarının farklı organizasyonlara göre çeşitlenmesi Şekil 5'de gösterildiği gibi sınıflandırılabilir. Şarj yöntemi sırasındaki fiziksel temaslarına bağlı olarak EA akü şarjı, iletken ve endüktif şarj yöntemlerine ayrılabilir. İletken şarj yönteminde güç aktarım modu araçlarla doğrudan temas yoluyla gerçekleşir; dolayısıyla daha verimlidir.

Endüktif şarj yönteminde araç ile güç kaynağı arasında fiziksel bir temas yoktur ve güç, elektromanyetik alan kullanılarak aktarılır. Bu nedenle kablosuz şarj yöntemi olarak da bilinir. Kablosuz şarj, EA'ların otomatik şarjı olarak kullanılabilir ve kablolardan kaynaklanan şok risklerini ortadan kaldırır, ancak eksiklik, yüksek güç kaybı nedeniyle düşük verimliliklidir. Endüktif şarj üç modda sınıflandırılabilir: Statik endüktif şarj, Yarı dinamik kablosuz şarj ve Dinamik kablosuz şarj. Statik şarj, evlerin garajları, otoparklar, trafik sinyalleri vb. gibi uygun şarj konumlarının avantajına sahiptir. Ancak, otoyollardaki sürüş menzili

olan EA'larla ilgili asıl sorunu çözemeler. Yarı dinamik şarj, trafik ışıkları gibi sürüş sırasındaki kısa duraklarda kullanılır. Elektrikli araçların sürüş menzilinı artırır. Dinamik endüktif şarjda araçlar, özel olarak tasarlanmış bir şarj yolundan geçerken sürekli olarak şarj edilir. Sağlıklı endüktif şarj, düşük güç verimliliği, kısa menzil, hacim ve maliyet etkinliği gibi teknik zorlukların yanı sıra kullanıcı dostu, güvenilir vb. gibi bazı estetik niteliklere sahiptir. İletken veya doğrudan temaslı şarj yöntemleri, güç aktarımının daha verimli bir yoludur; dolayısıyla kablosuz şarj sistemlerine göre daha yaygın ve köklüdür (Hemavathi & Shinisha, 2022).



Şekil 5. EA şarj teknolojilerinin ayrıntılı metodolojik sınıflandırması (Bharathidasan et al., 2022)

Şarj cihazlarının konumuna bağlı olarak iletken şarj iki kategoriye ayrılır: Şarj cihazının aracın içine yerleştirildiği araç içi şarj ve şarj cihazının aracın dışına yerleştirildiği araç dışı şarj. Yerleşik şarj cihazları büyük ölçüde yavaş şarj cihazları olarak uygulanırken, yerleşik şarj cihazları hızlı şarj cihazları olabilir (Kumar & Alok, 2020).

SAE ve EPA, EA şarj cihazlarını, şarj cihazlarının güç değerlerine göre Seviye-1 (AC), Seviye-2 (AC) ve Seviye-3 (DC) olarak sınıflandırmıştır. Seviye 1 şarjı müşterinin bulunduğu yerde gerçekleştirilir ve FEA aküsü, konut birimlerindeki (2-3 kW) mevcut, tipik olarak tek fazlı bir elektrik devresi kullanılarak gece boyunca şarj edilir. Diğer bir şarj seçeneğinde ise AC seviye 2 şarj cihazları halka açık otoparklara (işyerleri, alışveriş merkezleri vb.) yerleştirilmiştir. Bu şarj cihazları sabit araçlara 6 ila 7 kW güç sağlar. Son olarak,

hızlı şarj veya ultra hızlı şarj, DC gücünü 50 kW'tan 350 kW'a kadar aktarabilir; maksimum 600 A akımla 500 kW'a kadar şarjı ve ayrıca 1500 V'a kadar voltajları destekleyen CHAde MO'yu takip ediyor. Buna karşılık, hızlı modeller (50 kW) 160 kilometrelik bir yolculuğu 30 dakikada tamamlamaya yetecek enerjiyi sağlayabilir, ancak büyük akülere sahip üst düzey araçlar için ultra hızlı modeller tercih edilir (He et al., 2023).

EA'lar ve elektrik şebekesi arasındaki güç akışının yönü, şarj cihazını iki kategoriye ayırdı. Güç yalnızca G2V'den akabiliyorsa, tek yönlü şarj cihazları olarak adlandırılır ve şebekeye güç enjeksiyonunu kısıtlar, bu da tek yönlü şarj cihazlarının sınırlamasını gösterir. Çift yönlü güç akışı, çok sayıda talep tarafı yönetim planlaması V2G ve G2V uygulamasını mümkün kılar. Bu teknolojiler, beklenmedik sistem arızaları durumunda yük eğrisinin düzleştirilmesi gibi dağıtım şebekesinin sağlıklı güvenilirliğinin artırılmasına yardımcı olabilir. Ayrıca, yoğun bir şekilde nüfuz eden V2G, yeni enerji üretim altyapısına yapılan yatırımı azaltabilir. Bu nedenle, şarj cihazı seçerken uygun şarj teknolojisinin seçilmesi hayati öneme sahiptir. Li-ion bataryaları şarj etmek amacıyla şarj cihazının çıkışını kontrol etmek için çeşitli şarj topolojileri kullanılıyor. CC/CV topolojisi açık ara en yaygın şarj yöntemidir. Bununla birlikte, iç direnç, yaşlanma vb. gibi dikkate alınmayan çok sayıda iç faktör vardır. Buna göre, birçok yeni topolojiyi üretmek için kapsamlı bir Li-ion batarya modeli kullanılmıştır (Khalid et al., 2022).

Elektrik motorunu kontrol etmek için kullanılan bataryalar, dönüştürücüler ve invertörler ve şebekeye bağlı şarj modülü gibi EA'ların tüm işlevleri izolasyon gerektirir. Ancak transformatör, mevcut elektrik sistemi ile EA Tedarik Ekipmanı arasındaki temastaki temel bileşendir. EA gövdesinde yerleşik veya yerleşik şarj cihazları bulunup bulunmadığına bakılmaksızın, şarj işlemi sırasında bataryanın toprağa bağlanması gerekir. Şarj cihazı ile batarya arasında elektriksel bir ayırım olmadığında izolasyon izlemesi gereklidir (Hasan et al., 2021).

Yalıtılmamış DC-DC dönüştürücüler, düşük frekans tekniğinin dönüşüm aşaması gibi diğer avantajların yanı sıra basit yapı, yüksek verimlilik, yüksek güvenilirlik, düşük maliyet, küçük boyut ve ağırlık gibi avantajlara sahiptir; ancak galvanik izolasyon sağlamaz. Ayrıca akülerin şebekeden galvanik olarak izole edilmesini sağlayan bir hat frekans transformatörüne ihtiyaç duyulmaktadır. Gerekli manyetik malzemeler nedeniyle bu şarj istasyonu stratejisi, hat frekans transformatörüyle birleştirildiğinde kapsamlı ve pahalı bir sistemle sonuçlanır. Bu nedenle, manyetik malzeme miktarını azaltmak ve şarj istasyonunun toplam hacim gereksinimlerini azaltmak için DC-DC dönüşüm aşamasına galvanik entegre edilerek çalışma anahtarlama frekansının artırılması gerekir (Shrivastava et al., 2023).

Gerekli indüktörlerin (L), kapasitörlerin (C), soğutma sisteminin ve izolasyon transformatorünün önemli boyut ve ağırlığından dolayı, akü şarj cihazlarının sıklıkla devre dışı düzenlemeler olarak kullanılması amaçlanmaktadır. Yüksek frekanslı bir transformator, yüksek frekanslı bir izolasyon şemasında DC-DC dönüştürücü adımında galvanik izolasyon sağlar. Transformator tasarımı, boyutu, maliyeti ve kayıpları en aza indirmek için kritik öneme sahiptir. Yüksek frekanslı transformatorlerden izolasyon aynı zamanda gelişmiş kontrol, yük ekipmanı güvenliği, kompaktlık ve EA uygulamalarına uygulanabilirlik için voltaj modifikasyonuna da olanak tanır. Ayrıca transformatorün tasarımı, özellikle kısmi yük koşullarında dönüştürücülerin yumuşak anahtarlamasını etkileyebilir. Seviye 2 şarj ekipmanına uygun gücü sağlamak için mevcut elektrik kaynağının Seviye 1 ve Seviye 2 şarj ekipmanıyla çalışabilecek seviyeye düşürülmesi gerekir. Halihazırda sahada yoksa, Seviye 2 şarjı için enerjiyi 208–240 V'a veya Seviye 3 şarjı için 480 V'a kadar kademelendirebilen bir izolasyon transformatorü gerekli olacaktır. EA besleme devrelerine yönelik personel koruma sistemleri kılavuzu, EA'ları şarj etmek için topraklanmış veya izole edilmiş devrelerde kullanıcının elektrik çarpması riskini azaltmak üzere tasarlanmış cihaz veya sistemlere ilişkin gereklilikleri kapsar (Rajendran et al., 2021).

3. EA ŞARJ UYGULAMASI İÇİN DC-DC DÖNÜŞTÜRÜCÜ TOPOLOJİLERİ

EA endüstrisinin gelişimi, akü şarj cihazlarının geliştirilmesine kritik derecede bağlıdır. EA batarya ömrü ve şarj süresi doğrudan şarj cihazının özelliği ile ilgilidir. Bir şarj cihazının yüksek güç yoğunluğuna, verimliliğe ve güvenilir bir döküme sahip olması gerekir. Bir şarj cihazının çalışması, içinde kullanılan dönüştürücüye, kontrol algoritmasına ve anahtarlama stratejisine bağlıdır. Şebeke tarafındaki güç kalitesi, herhangi bir akü şarj cihazının önemli bir parçasıdır. Şarj sırasında EA'ların doğrusal olmayan yükü, şebekede minimum bir harmoniğe neden olmalıdır. Bir dizi şebeke standardının gerekliliklerini karşılamak için bir dönüştürücü devresi eklenir; bu devreye PFC birimi adı verilir. Akü şarj cihazları birçok düşük frekanslı harmoniği indükler, dolayısıyla güç dönüşümünde PFC devresi gereklidir. Kurşun-asit akünün şarjı, hassas voltaj ve akım dalgalanmaları gerektirmediği için tek aşamalı AC-DC dönüşümü ile yapılabilir. Ancak Li-ion batarya için hassas bir düşük voltaj dalgalanması gereklidir. İki aşamalı güç dönüştürme (AC-DC/DC-DC) devresi, doğası gereği düşük frekanslı dalgalanmaları reddedebilir (Khalid et al., 2022).

Geleneksel bir yükseltme dönüştürücüsü tasarımı basittir ve kullanımı kolaydır; dolayısıyla en yaygın kullanılan topolojisi PFC uygulamasındadır. Bu dönüştürücü iyi bir çıkış voltajı kazancına sahiptir. Anahtar kolayca yere itilebilir,

giriş akımı süreklidir ve elektromanyetik girişim (EMI) gereksinimlerini filtrelemek ve elde etmek kolaydır. Çıkış voltajı tek kutuplu olduğundan ve devre basit olduğundan maliyeti düşüktür, bu da onu BEV ve PHEV güç aktarma organları için iyi bir seçim haline getirir. Ancak birkaç sınırlaması vardır. Çıkış voltajındaki dalgalanmayı azaltmak için büyük bir kapasitöre ihtiyaç duyulduğundan, hacmi nispeten büyük ve ağır hale getirdiğinden, yüksek voltaj kazancı bu dönüştürücü için ideal değildir. Bu topoloji, 1 kW'a (kilovat) kadar orta güçte verimli çalışma sağlar. Daha yüksek bir güç değerinde voltajı ve akımı kontrol etmek ve algılamak zorlaşıyor. Güç değeri arttıkça indüktörün boyutu da artar (He et al., 2023).

Geleneksel takviye dönüştürücünün önemli sınırlamalarından biri, çalışma gücü derecesidir. Aralıklı güçlendirme dönüştürücüsünün (IBC) devresi, iki anahtarın işlemleri arasında 180 derecelik faz kayması olan iki paralel güçlendirme dönüştürücüsü içerir. Bu nedenle, dönüştürücünün giriş tarafındaki, yani doğrultucu devresindeki güç kaybı, PFC'yi güçlendirmeye neredeyse benzer olmasına rağmen, 3–3,5 kW güç aralığında çalıştırılabilir. Serpiştirilmiş devre, faz kaymasını dönüştürücü anahtarlar arasında eşit olarak bölerek n kanallı yapılabilir. Giriş akımı dalgalanmasını azaltabilir ve çıkıştaki dalgalanmaları iptal edebilir. Aralıklı dönüştürücünün asimetrik tasarımı, anahtarların faz kaydırma işlemini yöneterek giriş tarafındaki EMI filtresinin boyutunun azaltılmasına yardımcı olabilir. Dönüştürücünün boyutunu ve maliyetini etkileyecek olan tepe gürültüsünün azaltılmasına yardımcı olabilir. Dönüştürücüdeki akım, giriş akımındaki dalgalanmaları iptal edebilen tüm indüktör akımının toplamıdır. Bu nedenle, çok kanallı serpiştirilmiş bir dönüştürücü, EMI filtresinin tasarımı, çıkış kapasitörünün ömrü ve dönüştürücünün genel verimliliği açısından çok daha iyi sonuçlar verir (Naseri et al., 2023).

Tipik bir DC-bus mimarisi, 200 V ile 450 V arasındaki akü voltaj aralığından daha yüksek olan 600 V'a kadar bir voltaj aralığına sahiptir. DC bara mimarisi için aküleri şarj etmek amacıyla tek fazlı bir dönüştürücü kullanılabilir. Öte yandan, tek fazlı Buck dönüştürücü, yüksek akım uygulamalarında indüktör akımı dalgalanmalarını minimumda tutmak için dev bir indüktör gerektirir. Büyük indüktör dönüştürücünün maliyetini ve boyutunu artırır. Şekil 5(b)'de gösterildiği gibi, aralıklı takviye dönüştürücünün içerdiği çok fazlı aralıklı düşürücü dönüştürücü, devasa indüktörün yerine kullanılabilir. Çok fazlı aralıklı düşürücü dönüştürücünün farklı indüktörleri, dönüştürücünün verimliliğini artırmak için kullanılır. Bu dönüştürücü, çok fazlı modüllerden gelen akımları paylaşır. Faz sayısı arttıkça her bir indüktörün temel frekansı ile faz sayısı çarpıldığında indüktörün boyutu küçülür. Pek çok avantajına rağmen bu

dönüştürücü, önden izole edilmiş düşük frekanslı transformatör ve önemli toplam harmonik bozulmaya (THD) sahip faz akımı içeren sistemlerle uyumluluğu nedeniyle henüz yaygın bir kabul görmemiştir. Aralıklı dönüştürücülerdeki pasif bileşenler için bir tasarım metodolojisini tartıştılar; ancak kontrol tasarım stratejisi açıklanmamıştır. Ancak serpiştirilmiş Buck dönüştürücülerin dijital uygulaması henüz tartışılmamıştır. EA hızlı şarj istasyonları için üç bacaklı aralıklı dönüştürücüyü tartışıyor. Akım kontrolü, toplam çıkış akımı kontrolünün dolaşım akımı kontrolünden ayrılmasıyla gerçekleştirilir (Yadlapalli et al., 2022).

Geleneksel ve aralıklı takviye dönüştürücüler, önce AC'yi DC'ye dönüştürmek için giriş redresörlerine sahiptir; ancak 'köprüsüz güçlendirme dönüştürücü' olarak adlandırılan bu dönüştürücünün kendisi, giriş diyot doğrultucusunun olmadığını söylüyor. Dolayısıyla bu dönüştürücü, ısı yönetimi gibi giriş diyot köprüsüyle ilgili sorunları ortadan kaldıracaktır. Aynı zamanda, bu topolojide her iki anahtar da bağlanmıştır ve ortak mod daha fazla giriş gürültüsü ekler. Bununla birlikte, köprüsüz PFC'de giriş voltajının algılanması, PFC toprağına giden değişken giriş hatları nedeniyle oldukça zordur (Bharathidasan et al., 2022).

Geleneksel takviye dönüştürücünün BEV ve PHEV uygulamaları için güç kaybı sorunu vardır. Yumuşak anahtarlamanın kullanılması bu sorunun üstesinden gelinmesine yardımcı olabilir. Sert anahtarlama genel olarak dönüştürücü kayıplarının artmasına neden olur. Aynı zamanda, yumuşak anahtarlama, anahtarlama geçişi sırasında voltajı (yani drenaj kaynağı voltajı (VDS)) veya akımı (yani drenaj kaynağı akımı (IDS)) sıfıra iterek anahtarlama kayıplarını ortadan kaldırır. Anahtarın AÇIK veya KAPALI geçiş fazı sırasında gerilim VDS veya akım IDS sıfır olur. Sonuç olarak gerilim ve akım çarpımı sıfırdır. Sonuç olarak, anahtarlama kayıpları en aza indirilebilir, bu da cihazın daha yüksek bir anahtarlama frekansında çalışmasına olanak tanır ve dönüştürücünün hacmini ve soğutucuyu önemli ölçüde etkiler. Yumuşak anahtarlama dönüştürücü düzeni iki anahtardan oluşur: bir birincil Anahtar S1 ve bir yardımcı anahtar S2. Birincil anahtar S1, yardımcı anahtar S2'den daha yüksek bir görev döngüsüne sahiptir ve dönüştürücünün ortalama çıkış voltajını belirler (Khalid et al., 2022).

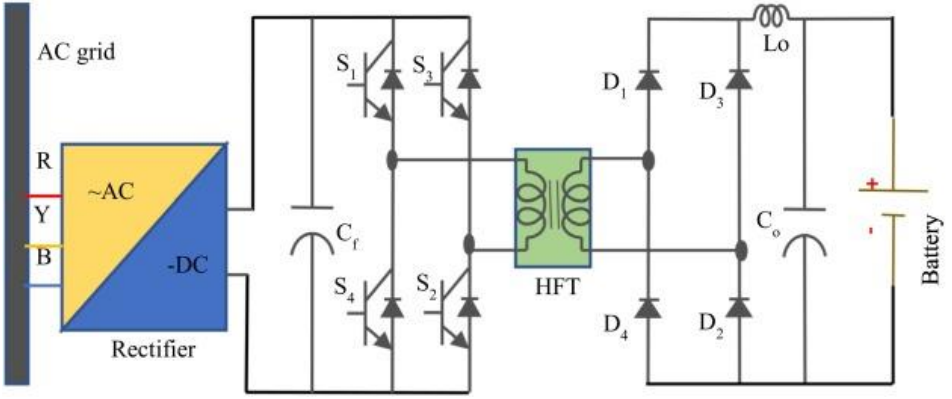
4. ELEKTRİKLİ ARAÇLARIN ŞARJ UYGULAMASI İÇİN YALITILMIŞ DC-DC DÖNÜŞTÜRÜCÜ TOPOLOJİLERİ

İzole DC-DC dönüştürücüler, araçların düşük ve orta güç uygulamalarında yaygın olarak kullanılır. En tipik topoloji, elektrikli araçların şarj uygulamaları için tam köprü yalıtımlı DC-DC dönüştürücüdür. Genel olarak izole edilmiş DC-DC dönüştürücünün DC/AC/DC çalışmasının üç ana aşaması vardır. Ara AC aşaması, yüksek frekanslı bir transformatör (HFT) kullanarak giriş voltajını daha

yüksek bir seviyeye yükseltir. Galvanik izolasyon ve yüksek voltaj kazancı EA'lardaki temel özelliklerdir ve HFT her ikisini de sağlayabilir. Beş ana bağımsız DC-DC dönüştürücü tipinin EA uygulamaları için öne çıkan topolojileri burada geniş ölçüde ele alınmaktadır (Austmann, 2021).

Yüksek verimliliği, yüksek güç yoğunluğu, güvenilirliği ve izolasyon kapasitesi nedeniyle tam köprü DC-DC dönüştürücü mimarisi, İzole dönüşüm için oldukça tercih edilir. Ancak transformatör kaçak endüktansı ve harici seri endüktans, hafif yüklerde açma sırasında ZVS kaybı, ikincil görev döngüsü kaybı, yüksek dolaşım akımı ve çıkış doğrultucu diyotlarında yüksek voltaj ani yükselmeleri gibi dezavantajlara neden olmuştur. Darbe genişlik modülasyonu (PWM) sinyalinin görev döngüsü, giriş kaynağı voltajı değişse bile çıkış voltajının sabit kalmasını sağlayacak şekilde hızlı bir şekilde yükseltilebilir veya azaltılabilir. Ancak yarı iletken anahtarları korumak için görev oranının %50'nin üzerinde tutulması gerekir; sonuç olarak yarım periyot süreli iki ayakta aynı kontrol sinyalleri kullanılır. Bir HFT kullanıldığında yüksek bir yükseltme voltajı mümkündür. Ayrıca giriş ve çıkış tarafları arasında galvanik izolasyon sunar. Dönüştürücünün verimliliği 30 kW yükte %91,5 civarındadır. Şekil 9, akım beslemeli tam köprü dönüştürücüyü (FBC) göstermektedir. Verimlilik, faz kaydırmalı PWM kontrolü ile ZVS yöntemi kullanılarak artırılabilir. Mevcut beslemeli mimari nedeniyle, EMI filtre bastırmanın IEEE standardı-519'a uygun olması gerekir. Anahtarlama devresindeki önemli elektriksel stres nedeniyle, dönüştürücünün yüksek verimliliğine rağmen HFT kaçak endüktansının etkisi kritiktir. Anahtarlama devresindeki tepe voltaj sorununu hafifletmek için bir kenetleme devresi (pasif/aktif) gereklidir (Khalid et al., 2022).

Full-Bridge LLC rezonans dönüştürücü (FBLLC), hızlı EA şarj cihazının DC-DC aşamasında kullanılacak başka bir olası dönüştürücüdür. LLC rezonans dönüştürücüsü voltaj veya akım kaynağı olarak çalışabilir. FBLLC rezonans dönüştürücü, yüksek voltajlarda mükemmel verimlilikle ve ana anahtarlar için geniş bir ZVS aralığıyla çalışabilir. Ayrıca sinüzoidal akım dalga şekli şekillendirildiği için doğrultucu diyotlarda salınım gerilimi ve ters toparlanma akımı yoktur. FBLLC rezonans dönüştürücü, bataryaların CC ve CV şarjını gerçekleştirmek için genellikle frekans modülasyonu, faz kaydırma modülasyonu veya yeniden tasarlanmış yapı kontrol tekniğini kullanır (Hasan et al., 2021). Şekil 6'da tipik şeması verilmektedir.



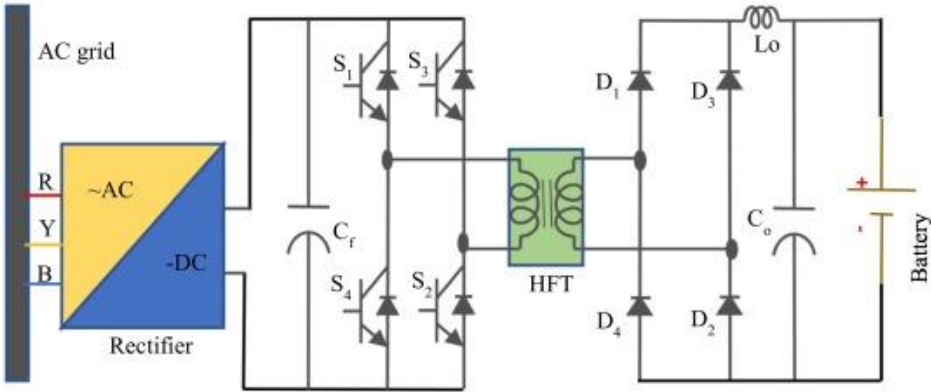
Şekil 6. Elektrikli araçların şarj edilmesi için tam köprü LLC rezonans dönüştürücü.

Frekans modülasyonunun aksine, faz kaydırmalı modülasyon, transformatörün tepeden tepeye akı yoğunluğunu azaltabilir. Transformatörün nüve kaybı önemli ölçüde azaltılabilir ve hafif yük altında yüksek verim elde edilebilir. Batarya şarj uygulamalarında kullanılan geniş bir çıkış voltajı aralığı için LLC rezonans dönüştürücülerin tasarımına odaklanmaktadır. Sayısız avantajına rağmen bu mimarinin ana dezavantajı, bataryanın çıkış voltajını düzenlemek için geniş bir anahtarlama frekansı aralığı gerektirmesidir. Bu, filtre ve transformatör tasarımlarını önemli ölçüde karmaşıktır ve akü voltajı düşük olduğunda dönüştürücünün çalışması daha az verimli hale gelir. Aşırı yük senaryolarında akımı azaltmak için kapasitör-diyot kelepçesi kullanan LLC rezonans dönüştürücüler için bir tasarım metodolojisi sundu. Bileşen toleranslarının etkisini kısıtlamak amacıyla çıkış voltajı dalgalanmasını en aza indirmek için yüksek güçlü uygulamalar için LLC rezonans dönüştürücünün aralıklı bir modeli önerilmektedir. Ancak rezonans dönüştürücünün rezonans frekansı çalışması dışında minimum anahtarlama kaybı ve düşük dolaşım akımı gibi önemli avantajlarını kaybeder. Rezonans frekansından daha yüksek bir anahtarlama frekansı altında kullanıldığında, FBLLC rezonans dönüştürücünün birincil anahtarları yüksek bir kapatma akımına maruz kalır. Öte yandan anahtarlama frekansı rezonans frekansından küçükse primer taraftan yüksek frekanslı bir dolaşım akımı akar. Ayrıca frekans aralığının geniş olması manyetik bileşenlerin optimizasyonunda zorluklara neden olur (He et al., 2023).

Soğuk başlatma, yumuşak anahtarlama ve izolasyon, izole edilmiş bir sıfır voltaj anahtarlama (ZVS) DC-DC dönüştürücüyü gerektirir. Bu mimari, daha basit devre sistemi, tam cihaz derecelendirme gerektirmeyen, zahmetsiz kontrol, ekstra devreler olmadan yumuşak anahtarlama ve geleneksel tam köprü kademeli

DC-DC dönüştürücülerden daha yüksek verimlilik özelliklerine sahiptir. Bu izole edilmiş ZVS dönüştürücüde kullanılan ana transformatörün her iki tarafındaki ikili yarım köprü topolojisini göstermektedir. Yumuşak anahtarlama için her anahtarlama cihazında küçük bir paralel kapasitör bulunur. ZVS dönüştürücü, herhangi bir ekstra bileşen olmadan güç akışının herhangi bir yönünde birleşik ZVS elde eder (Austmann, 2021).

Şekil 7 faz kaydırmalı tam köprü (PSFB) dönüştürücünün, yüksek güçlü uygulamalarda kullanılan en yaygın dönüştürücü olduğunu göstermektedir. PSFB dönüştürücüler, yardımcı devre içermeyen ZVS özelliklerine sahiptir. Sonuç olarak, PSFB dönüştürücüler, tipik FB dönüştürücülerden daha iyi bir toplam dönüşüm verimliliğine sahiptir. Bununla birlikte, birincil taraftaki dolaşım akımının yarattığı daha yüksek iletim kayıpları ve verimsiz güç aktarımı nedeniyle görev döngüsü kayıpları gibi dezavantajları vardır. PSFB dönüştürücüler genellikle birincil anahtarlar için yumuşak anahtarlama, basit bir kontrol mekanizması ve cihazlar üzerinde minimum akım stresi dahil olmak üzere çeşitli çekici özellikler sağlar. Bununla birlikte, PSFB dönüştürücülerin, serbest dönüş süresi sırasında yüksek dolaşım akımı ve doğrultucu köprüsündeki yüksek voltaj stresi gibi çeşitli dezavantajları vardır (Shrivastava et al., 2023).

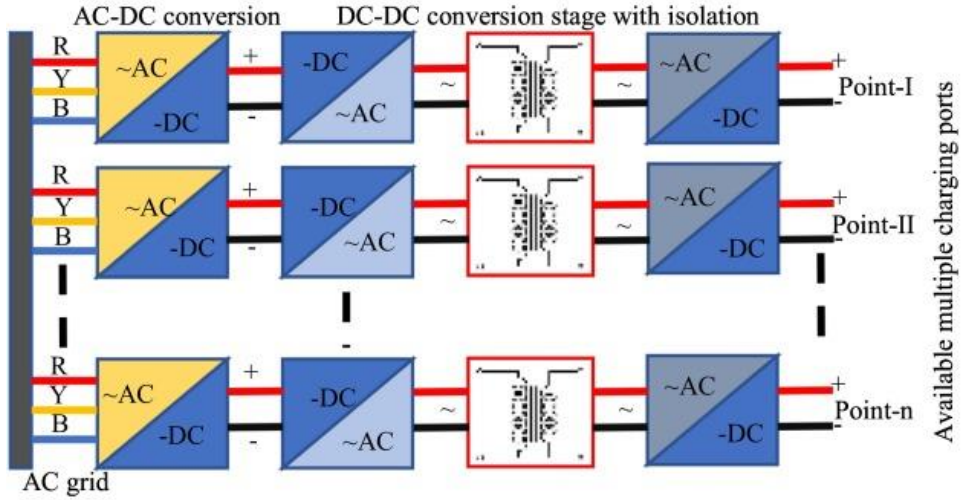


Şekil 7. Faz kaydırmalı tam köprü dönüştürücü EA şarjı.

5. HIZLI ŞARJ İÇİN DÖNÜŞTÜRÜCÜ TOPOLOJİLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ

Hızlı şarj istasyonları veri yolu tasarımına göre iki türe ayrılır: ortak AC veri yolu mimarisi ve ortak DC veri yolu mimarisi. Şekil 14, AC şebeke tarafında ortak bir bağlantıya ve her şarj istasyonu için özel ayrı bir AC-DC dönüştürücüye ve yüksek frekanslı transformatöre sahip ortak bir AC bara tasarım yapısını göstermektedir. Ancak bu mimarinin, her bir şarj ünitesi için cihaz ve kontrol devrelerinin sayısını arttıran, sistemin verimliliğini ve güvenilirliğini azaltan çok

sayıda ekipmana ihtiyaç duyulması gibi bazı dezavantajları vardır. Şekil 8'te gösterildiği gibi, ortak DC bara mimarisi, tek bir düşük frekanslı transformatöre sahip merkezi bir AC-DC dönüştürücülerden ve her şarj istasyonu için ayrı bir yalıtımsız DC-DC dönüştürücülerden oluşur. DC bağlantılarının topolojiye dahil edilmesi onu modüler hale getirir ve enerji depolama sistemlerinin (ESS) ve yenilenebilir enerjinin sisteme entegre edilmesine yardımcı olur (Kumar & Alok, 2020).



Şekil 8. Ortak AC veri yolu mimarisine sahip hızlı şarj istasyonunun şematik diyagramı.

Tek fazlı köprüsüz yükseltici dönüştürücüye çok benzer şekilde, üç fazlı köprüsüz yükseltici dönüştürücü, güç faktörü ayarından yararlanabilir. Ancak aynı zamanda güç kapasitesinin artırılması, anahtar geriliminin azaltılması ve filtre boyutunun küçültülmesine de yarar. Üç fazlı tek anahtarlı takviye PFC dönüştürücü, anahtar için sıfır akım açma özelliğine sahiptir, diyotta ters iyileşme yoktur, sabit bir frekansta çalışır, düzenlenmesi kolaydır ve uygun maliyetlidir. Yine de yalnızca düşük-orta güç dönüşümleri için uygundur (Yap et al., 2022).

Nötr nokta kenetlemeli (NPC) çok seviyeli invertörler literatürde iyi bir şekilde belgelenmiştir; ancak NPC'nin ters çalışması (AC'den DC'ye) burada tartışılacaktır. Bu nedenle, daha fazla bileşen gerektirir, ancak artan karmaşıklık, gelişmiş voltaj davranışı, daha küçük filtre boyutları, daha düşük akustik gürültü, daha az EMI ve birliğe yakın bir güç faktörü dahil olmak üzere birçok avantajı vardır. Yarısı, pozitif, negatif ve sıfır durumlu DC bara gerilimi nedeniyle bileşenler üzerindeki gerilim stresini azalttığından, bileşenlerin ihtiyaç

duyduğu bloklama gerilimi kapasitesi de yarı yarıya azalır (Hemavathi & Shinisha, 2022).

Matris dönüştürücüler ilk olarak potansiyel bir AC/AC dönüştürücü topolojisi olarak oluşturuldu ve daha sonra AC/DC topolojisine ve diğer çeşitli kullanımlara genişletildi. Doğrudan matris dönüştürücüler ve dolaylı matris dönüştürücüler iki tür matris dönüştürücüdür. AC/DC matris dönüştürücü, avantajlarının çoğunu dolaylı matris dönüştürücülerden alır. Diğerlerinin yanı sıra çift yönlü dönüşüm, büyük enerji depolama bileşenlerinin ortadan kaldırılması ve cihaz kayıplarının azaltılması gibi olumlu özelliklere sahiptir. Bir AC/DC matris dönüştürücünün yapısı, çift yönlü anahtarlama bileşenlerini kullanması dışında, gerilim kaynaklı köprü tipi dönüştürücünün yapısıyla hemen hemen aynıdır. Matris dönüştürücüler, geleneksel dönüştürücülerle karşılaştırıldığında iyi kontrollü bir düzeltme sağlar. Köprü tipi dönüştürücüler. Bu, ayrı bir DC voltaj kontrol mekanizmasına olan gereksinimi ortadan kaldırır.

Üç fazlı bir Viyana doğrultucunun yapısını göstermektedir. Bununla birlikte, daha az aktif anahtara sahip üç fazlı köprüsüz güçlendirme tasarımıyla aynı prensiplerle çalışır. Yüksek frekanslı PWM'nin düzenlenmesi, Vienna Redresörünü kontrol etmek için kullanılır. Erişilebilir nötr noktanın doğal avantajlarına sahiptir, bu da onu hızlı şarjlı DC bara mimarisi için avantajlı kılar. Kapatma sırasında anahtarların komütasyonu diyotlar tarafından gerçekleştirilir, bu da bu dönüştürücünün ölü zaman sorunu olmadığı anlamına gelir. Ancak bu dönüştürücü çıkış DC tarafında yüksek voltaj gerektirir. Kontrol edilen üç anahtardan biri her zaman kapalı kaldığı için, kapasitörler üzerindeki minimum voltaj, hattın giriş AC voltaj hattına olan tepe noktası olacaktır. Ayrıca, Dengesiz şebekeler, DC hattı voltajında ve giriş aktif/reaktif gücünde temel frekansın iki katı dalgalanmalar oluşturarak Viyana doğrultucu topolojisinin performansını düşürür. Bu nedenle, minimum DC voltajının hattan hatta AC voltajının en az iki katı olması gerekiyordu (Shrivastava et al., 2023).

Z kaynağı dönüştürücü ilk olarak 2002 yılında güç kaynağı ile anahtar ağı arasında bir empedans ağı olarak tanımlandı. Giriş veri yolu voltajının büyüklüğünden bağımsız olarak çıkış voltajını değiştirme yeteneği, Z kaynağının temel avantajlarından biridir. Bu nedenle, empedans ağı diğer dönüştürücü topolojileriyle birleştirilerek hem güç hem de güçlendirici yeni dönüştürücüler oluşturuldu. Çift yönlü şebeke arayüzü dönüştürücüleri için, yukarıda belirtilen yeteneğin son derece yararlı olduğu görülmüştür. Bir voltaj kaynağı dönüştürücüsüne bağlı bir empedans ağı kullanan çift yönlü bir Z kaynağı dönüştürücüsünü sundu. Ancak bu dönüştürücünün ana dezavantajı, EA'ların batarya ömrünü kısaltabilecek süresiz giriş akımıdır. Bu nedenle, yarı-Z kaynak dönüştürücü (QZS), süresiz akım sorununu önlemek için kullanılan değiştirilmiş

bir Z-kaynak dönüştürücüsüdür. QZS ağı, sabit giriş akımı, kapasitörler üzerindeki minimum voltaj stresi ve devrenin girişi ile çıkışı arasındaki ortak topraklama dahil olmak üzere birçok önemli özelliğe sahiptir. Bu özelliklerden dolayı bu empedans ağı çok çeşitli uygulamalar için uygundur. Çeşitli voltajları kontrol ederken sabit bir giriş akımını korumak, onu hızlı şarj için AC-DC dönüşümü için uygun bir aday haline getirir. Aynı anda iki enerji depolama cihazını bağlayabilen değiştirilmiş bir yarı-z kaynak dönüştürücüsünü göstermektedir. Bununla birlikte, bu dönüştürücünün dönüşümde düşük voltaj kazancı sınırlaması vardır. Gerilimi artırmak ve QZS empedans ağını kazanmak için, yüksek frekanslı transformatörler kullanılmış ve kuplajlı indüktörler kullanılmıştır. Ancak diyotlar ve anahtarlar üzerindeki gerilim/akım stresi artacak ve daha yüksek ağırlık, hacim ve güç kaybına neden olacaktır. Önemli voltaj kazançları elde etmek için yüksek kademeli bir QZS dönüştürücüyü sundu; Bu dönüştürücü, hibrit anahtarlama kapasitörlerinin anahtarlama indüktör tekniğini kullanır. Tartışılan dönüştürücü, sabit giriş akımı ve kapasitörler üzerindeki düşük voltaj stresi gibi temel faydalarını korurken, temel QZS dönüştürücünün voltaj kazancı sınırlamasının üstesinden gelir. Ancak bu dönüştürücü bileşen sayısını artırır (Hasan et al., 2021).

6. SONUÇ

Elektrikli araçlar için Li-ion bataryaların ticarileştirilmesi, kurşun-asit, nikel-metal hidrit ve diğer alternatiflere kıyasla daha yüksek enerji yoğunluğu, daha uzun ömür ve en yüksek maliyet gibi özelliklerinin bir sonucudur. EA'ler için Li-ion bataryalara yönelik artan talep, batarya performansını zayıflatmadan şarj tekniğinin hızını ve tutarlılığını artırmak için bazı yeni optimal şarj yöntemlerinin geliştirilmesini artırdı. Bataryanın şarj edilmesi, batarya yönetim sistemlerinde (BMS) en önemli konudur. Genel olarak, bir akü şarj cihazının aşağıdaki üç işlevi vardır; aküye şarj sağlamak, şarj oranını optimize etmek ve şarjı sonlandırmak. Bataryanın kimyasına bağlı olarak şarj, bataryaya farklı şarj yöntemleriyle iletilebilir. Bununla birlikte, şarj yöntemi ve batarya sıcaklığı, bataryada meydana gelen ve bataryanın yaşam döngüsünü doğrudan etkileyen aktif elektrokimyasal reaksiyonları önemli ölçüde etkilediğinden, Li-ion bataryanın özel bir şarj yöntemine ihtiyacı vardı. Uygulama karmaşıklığı, gerekli sensörler, maliyet ve popülerliğin yanı sıra şarj süresi, şarj verimliliği ve batarya ömrü döngüleri üzerindeki etki de algoritmaya göre değişir. Bunlar, CC-CV gibi en basit şarj algoritmalarından, kapalı döngü model tabanlı algoritmalar gibi en yaratıcı olanlara kadar uzanır.

Genel olarak, şarj akımının büyüklüğü, katı bir elektrolit arayüzünün (SEI) oluşumu ile doğrudan ilişkilidir. Yüksek akım büyüklüğü altında kalın bir SEI

filmi oluşturacaktır. SEI filmi kalınlığındaki bir artış batarya empedansında bir artışa neden olduğundan, SEI filminin kalınlığı batarya performansı ile ayrılmaz bir bağlantıya sahiptir. Ayrıca, bir bataryanın son şarj aşamasında, aşırı y¼ksek bir akım, g¼çlü kristalin terminal direği çevresinde birikmesine neden olur ve bu da bataryanın geri d¼nüş¼ olmayan bir şekilde hasar g¼rmesine neden olur. Nihai hedef, 100 mil menzile (24 kWh batarya takımı) sahip bir EA'ın 6C hız ile 10 dakikada tamamen şarj olmasıdır (C oranı, maksimum kapasitesine bağlı olarak kapasite boşalma oranını ifade eder. 1C hızı, batarya anlamına gelir) deşarj akımına bağlı olarak bir saat içerisinde tamamen deşarj olacaktır. Bu, 100 ampersaat kapasiteli bir ak¼ için 100 amperlik bir deşarj akımına karşılılık gelir). Yalnızca şarj hızlarının arttırılması, önemli bir sıcaklık artışına neden olabilir ve ak¼deki yan reaksiyonları hızlandırabilir. Hızlı şarj ile batarya sağlığı arasındaki denge aynı anda dikkate alınmalıdır. Sonuç olarak, ak¼ optimal şarj sistemi EA/FHEA araştırma alanında b¼y¼k ilgi g¼rd¼ g¼r¼lmüş¼tür.

KAYNAKLAR

- Austmann, L. M. (2021). Drivers of the electric vehicle market: A systematic literature review of empirical studies. *Finance Research Letters*, 41. <https://doi.org/10.1016/j.frl.2020.101846>
- Aydoğdu H., and Cengiz Ç., (2015). Gamma Renewal Function in Censored Data, *Bitlis Eren Univ Journal Science and Technol.* 5 (2), 97 – 101.
- Bharathidasan, M., Indragandhi, V., Suresh, V., Jasiński, M., & Leonowicz, Z. (2022). A review on electric vehicle: Technologies, energy trading, and cyber security. In *Energy Reports* (Vol. 8, pp. 9662–9685). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.07.145>
- Cengiz, Ç. (2024). Relationship of Braking Distance and Rear Headlight on Highways. *Light and Engineering* 32, 2, 29–36.
- Cengiz, Ç. (2019). Nonparametric estimation of a renewal function in the case of censored sample, *Bitlis Eren University Journal of Science and Technology*, 9(2) 54–57
- Hasan, M. K., Mahmud, M., Ahasan Habib, A. K. M., Motakabber, S. M. A., & Islam, S. (2021). Review of electric vehicle energy storage and management system: Standards, issues, and challenges. *Journal of Energy Storage*, 41. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102940>
- He, L., Jing, H., Zhang, Y., Li, P., & Gu, Z. (2023). Review of thermal management system for battery electric vehicle. In *Journal of Energy Storage* (Vol. 59). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.106443>
- Hemavathi, S., & Shinisha, A. (2022). A study on trends and developments in electric vehicle charging technologies. In *Journal of Energy Storage* (Vol. 52). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105013>
- Khalid, M., Ahmad, F., Panigrahi, B. K., & Al-Fagih, L. (2022). A comprehensive review on advanced charging topologies and methodologies for electric vehicle battery. *Journal of Energy Storage*, 53. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105084>
- Kumar, R. R., & Alok, K. (2020). Adoption of electric vehicle: A literature review and prospects for sustainability. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 253). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119911>
- Mahmud, I., Medha, M. B., & Hasanuzzaman, M. (2023). Global challenges of electric vehicle charging systems and its future prospects: A review. *Research in Transportation Business and Management*, 49. <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2023.101011>

- M.S. Cengiz, and M. Mamis, (2015). Use of Solar Energy in Electric Vehicles, *Int. J. Eng. Technol.*, vol. 1, pp. 123.
- M.S., Cengiz, Ç., Çengiz, (2018). Numerical Analysis of Tunnel Led Lighting Maintenance Factor. *IIUM Engineering Journal*, 19, 2, 154–163. <https://doi.org/10.31436/iiumej.v19i2.1007>
- Mamiş, M.S., Cengiz, M.S., (2015). Solution Offers For Efficiency and Savings in Industrial Plants. *Bitlis Eren University Journal of Science and Technology*, vol. 5. 1, 24-28.
- Naseri, F., Gil, S., Barbu, C., Cetkin, E., Yarimca, G., Jensen, A. C., Larsen, P. G., & Gomes, C. (2023). Digital twin of electric vehicle battery systems: Comprehensive review of the use cases, requirements, and platforms. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews (Vol. 179)*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113280>
- Rajendran, G., Vaithilingam, C. A., Misron, N., Naidu, K., & Ahmed, M. R. (2021). A comprehensive review on system architecture and international standards for electric vehicle charging stations. In *Journal of Energy Storage (Vol. 42)*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103099>
- Shrivastava, P., Naidu, P. A., Sharma, S., Panigrahi, B. K., & Garg, A. (2023). Review on technological advancement of lithium-ion battery states estimation methods for electric vehicle applications. In *Journal of Energy Storage (Vol. 64)*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.107159>
- Yadlapalli, R. T., Kotapati, A., Kandipati, R., & Koritala, C. S. (2022). A review on energy efficient technologies for electric vehicle applications. In *Journal of Energy Storage (Vol. 50)*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104212>
- Yap, K. Y., Chin, H. H., & Klemeš, J. J. (2022). Solar Energy-Powered Battery Electric Vehicle charging stations: Current development and future prospect review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 169. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112862>

11. Bölüm

Tarhananın Fonksiyonel Özelliklerinin Geliştirilmesinde Bazı Proses ve Katkı Maddelerinin Uygulanabilirliği Üzerine Bir Araştırma

Süleyman GÖKMEN^{1*}
Abdülkadir DİLBER²

¹ Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu,
Gıda İşleme Bölümü, Karaman, Türkiye
*e-mail: sugokmen42@hotmail.com

²

Özet

Tarhana alkol ve asit fermantasyonunun birlikte gerçekleştirildiği geleneksel fonksiyonel bir geleneksel gıdadır. Bir diğer deyişle, buğday ürünlerinin yoğurt gibi süt ürünleri ve bazı sebze ve baharatlarla karıştırılıp hem laktik asit hem de alkol fermantasyonuna tabi tutulmasıyla üretilen, fermantasyondan sonra kurutulmuş dayanıklılığı artırılan, yarı hazır besleyici bir gıda maddesidir. Tarhananın tüketiminin artırılması kalite özelliklerinin özellikle de farklı ürünlerin üretimi ve fonksiyonel ürünlerin geliştirilmesi ile yakından ilişkilidir. Bu nedenle bu çalışmada tarhana üretiminin fermantasyon aşamasında farklı prosesler ve katkı maddelerinin uygulanabilirliği hakkında bilgi verilecektir. Bu amaçla tarhana üretiminde fermantasyonun vakum altında yapılmasının ve/veya tarhanaya bu aşamada kefir ilavesinin tarhananın bazı fonksiyonel özelliklerinin geliştirilebilirliği konusu araştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Fonksiyonel Gıdalar, Tarhana, Vakum, Fermantasyon, Probiyotik

Tarhana, buğday ürünlerinin yoğurt gibi süt ürünleri ve bazı sebze ve baharatlarla karıştırılıp, hem laktik asit hem de alkol fermantasyonuna tabi tutulmasıyla üretilen, fermantasyondan sonra kurutulmuş dayanıklılığı artırılan, yarı hazır besleyici bir gıda maddesidir (Karahana vd., 2019). Tarhana yurdumuzda daha çok çorba olarak tüketilmekle birlikte değişik yörelerde tüketim alışkanlıkları ve farklı üretim tekniğine bağlı olarak toprak veya plaka halinde üretilip kurutulduktan sonra çerez gibi de tüketilebilmektedir (Erbaş, 2003). Geleneksel gıdalarımızdan olan tarhana, önemli bir besin kaynağımız olup zengin probiyotikler, prebiyotikler ve sindirilemeyen bileşenleri kapsadığından fonksiyonel gıda olarak ta tanımlanabilmektedir (Yıldırım ve Güzeler, 2016). Başka bir deyişle, fermente bir gıdamız olan tarhana, hem laktik asit hem de etil alkol fermantasyonu sonucu üretilir (Temiz ve Pirkul, 1990). Tarhananın bileşimindeki besin maddelerinin bakteriler ile ön sindirimini yapılması, tarhanayı daha kolay sindirilebilir hale getirmektedir. Bunun sonucu olarak sindirilebilirlik ve biyoyararlılık üründe artmaktadır (Özbilgin, 1983; Saldamlı, 1983).

Yoğurdun temel aminoasitlerle zengin olması sayesinde tarhana besin açısından zenginleşmektedir (Özbilgin,1983; Temiz ve Pirkul, 1990).Tarhana ülkemizde kış mevsimi için hazırlanan yiyecekler arasında yer almaktadır. Yakın zamana kadar ülkemizde daha çok kırsal kesimlerde üretilen bir gıda ürünü olmakla birlikte son yıllarda kentsel nüfusun hızla artması, özellikle kadınların iş hayatına katılması hazır gıdalara duyulan gereksinimi artırmış ve tarhana da hazır çorbalar arasına girmiştir (Göçmen ve ark., 2003). Nitekim Türkiye genelinde endüstriyel tarhana üretici sayısı 200'ün üzerine çıkmıştır ve bu sayı gün geçtikçe hızla yükselmeye devam etmektedir (Özel, 2021).

Tarhananın üretiminde yapıldığı yöreye has ve alışkanlıklarına bağlı olarak ham madde ve miktarları değişiklik gösterdiği için standart bir üretim metodu yoktur (İbanoğlu ve ark, 1999). Geleneksel üretim ile özellikle ev ölçeğinde gerçekleştirilen tarhana üretiminde esas olan dört aşama bulunmaktadır. Bunlar sırasıyla;

- Karışıma girecek tüm malzemelerin temizlenip hazırlanması,
- Hamurun hazırlanması,
- Hamurun fermantasyona bırakılması,
- Son olarak ta hamurun kurutulmasıdır.

Fermantasyondan sonra tarhana genellikle güneşte kurutulmaktadır (Özdemir ve ark, 2007). Tarhananın gerek kimyasal gerek mikrobiyolojik özelliklerinin oluşmasında üç önemli husus bulunmaktadır. Bunlardan birincisi hamur

bileşiminde yer alan ham madde çeşitliliği, ikincisi hamur fermantasyonu ve sonuncusu ise fermantasyon sonrası uygulanan (kurutma, öğütme vb.) teknolojik işlemlerdir. Hamuru oluşturan ham maddelerin mikrobiyolojik özellikleri hamur fermantasyonunda aktif rol oynayan mikrobiyota kompozisyonunu doğrudan etkilemektedir. Hamur fermantasyonundan sorumlu mikrobiyota çeşitli Laktik Asit Bakterileri (LAB) ve maya türlerinden oluşur. Söz konusu mikrobiyota fermantasyonda uygulanan parametrelere ve hammadde çeşitliliğine göre üretimler arasında değişkenlik gösterebilir. Bilindiği gibi tarhananın kendine has çoğu duyuşal özelliği (organoleptik, aromatik, asitlik özellikleri vb.) mikroorganizmalar tarafından gerçekleştirilen fermantasyon basamağında oluşmaktadır (Özel, 2021).

Tablo 1’de görüldüğü üzere, Anadolu kültürünün değişmez lezzet unsurlarından olan tarhananın yapımı ve içeriği bölgeden bölgeye hatta yöreden yöreye farklılık göstermektedir (Gök ve ark, 2017).

Tablo 1. Türkiye’de tüketilen tarhana çeşitleri (Coşkun, 2014)

Tarhana İsmi	İlgili bölge
Un tarhanası	Ege Bölgesi
Göce tarhanası (top tarhana)	Ankara, Maraş, Muğla, Aydın
Top tarhana	Isparta
Trakya tarhanası	Kırklareli, Edirne, Tekirdağ
Ak tarhana	Kütahya
Süt tarhanası	Çanakkale
Üzüm tarhanası	Tokat
Tatlı tarhana	Malatya
Beyşehir tarhanası	Konya
Göçmen tarhanası	Marmara Bölgesi
Yaş tarhana	Kastamonu, Eskişehir, Çankırı
Uşak tarhanası	Uşak
Pancarlı tarhana	Kastamonu
Gediz tarhanası	Kütahya
Kıymalı tarhana	Trakya Bölgesi
Et tarhanası	Karaman
Erik tarhanası	Antalya
Kızılıcak (kiren) tarhanası	Kastamonu, Kütahya, Bolu, Bursa, Zonguldak

Şekil 1’de ise yaygın olarak üretimi yapılan bazı tarhana çeşitlerine yer verilmiştir.



Şekil 1. Ülkemizde yaygın bir şekilde üretimi ve tüketimi yapılan tarhana çeşitleri (Coşkun, 2014).

Düşük pH (3.8-4.2) ve düşük nem içeriği (%6-9) tarhanayı, patojen ve diğer mikroorganizmalara karşı güvenli hale getirmektedir. Tarhana higroskopik özellikte olmaması nedeniyle 1-2 yıl herhangi bir bozulma olmaksızın muhafaza edilebilmektedir (İbanoğlu ve ark., 1999). İçerdiği zengin besin bileşenleri ile insan beslenmesinde önemli rol oynamaktadır. İçeriğindeki undan gelen bitkisel proteinler ve yoğurttan gelen hayvansal proteinlerin birbirini tamamlaması ve fermente bir ürün olması tarhananın sindirilebilirliğini ve biyoyararlılığını arttırmaktadır (Çevik, 2016). Protein değeri yüksek, sindirimi kolay olan tarhana özellikle bebekler, yeme güçlüğü çeken kişiler, okul çağındaki çocuklar gibi protein gereksinimi yüksek olan kişiler için oldukça yararlı bir gıdadır (Özel, 2021).

Tarhana yapım aşamasında fermentasyon ile besin maddelerinin sindirilebilirliği ve besleyici değeri artmaktadır. Fermentasyon ile tüketici tarafından aranan tat, koku ve aroma oluşmaktadır. Bunun yanında raf ömrü uzun bir ürün olma özelliği de kazanmaktadır (Tamer ve ark., 2007). Bugüne kadar tarhananın hamur fermentasyonunun mikrobiyotasının araştırıldığı birçok çalışma yapılmıştır (Şengün ve ark, 2009; Settanni ve ark, 2011; Özel ve ark, 2015; Bozoudi ve ark, 2017; Şimşek ve ark, 2017; Vasiee ve ark, 2018; Bellici ve ark, 2019). Tarhananın karakteristik tat/aromasında LAB tarafından sentezlenen laktik asit başta olmak üzere pürivik, okzalik, ve süksinik asit gibi uçucu olmayan organik asitler ile asetaldehit, aseton, diasetil gibi karbonil bileşikler önemli yere sahiptir (Georgala ve ark, 1995; Tamime ve Robinson, 1999; Temiz ve Tarakçı, 2017; Arslan-Tontul ve ark, 2018; Özdemir ve ark, 2019; Tekgül ve ark, 2020). Bunların yanı sıra aromanın oluşmasında bazı uçucu yağ asitleri (formik, asetik, bütirik veya propiyonik asit), aldehytler, ketonlar, alkoller, laktonlar ve sülfür bileşenleri gibi uçucu bileşenlerin de rolü bulunmaktadır. Fakat bu bileşenlerden laktik asit ve karbonil bileşiklerinin tarhananın tat/aroma dengesinin oluşumundaki rolü birincil öneme sahiptir (Fernandez- Garcia ve McGregor, 1994). Asetik asit ise hem güçlü bir aroma oluşumunu sağlamakta hem de diğer aroma bileşenlerinin etkisini arttırmaktadır (Kılıç, 2008). Bessmeltseva ve ark. (2014), ekşi hamurda uygulanan farklı fermentasyon sıcaklıklarının hamurda laktik asit bakterileri (LAB)'nin tür sayısını ve dağılımını etkilediğini bildirmişlerdir. Fermentasyon ortamının pH değeri, fermente ürünün mikrobiyotasını doğrudan etkileyen bir diğer parametredir.

Tahıllar çözünebilir diyet lif içerikleri ile probiyotik laktik asit bakterileri ve bifidobakteriler için prebiyotik özellik gösteren fonksiyonel gıdalardır (Şimşekli ve Doğan, 2015). Tahıl ürünleri ayrıca fenolik bileşiklerce de zengindir.

Flavonoid, tanin ve izoflavonoid tahıllarda bulunan ve antioksidan aktiviteye sahip olduğu bilinen bazı fenolik bileşiklerdendir (Ertaş, 2018).

Tarhananın ana malzemelerinden olan yoğurt, probiyotik özelliği sebebiyle bağışıklık sistemini güçlendirir (Blandino ark., 2003). İçerisinde bulunan soğan, domates, diğer bitki ve baharatlar ile antioksidan özellik kazanan tarhana, birçok hastalığa karşı önleyici fonksiyonel özellikler taşımaktadır (İbanoglu ve İbanoglu 1999; Hayta ark., 2002).

Fermente süt ürünleri de insan beslenmesinin önemli bir parçasını oluşturmakta olup, süt ürünleri içinde bu ürünlerin ayrı bir yeri ve önemi vardır. Son yıllarda özellikle yoğurt, kefir ve diğer probiyotik süt ürünlerinin tüketimi birçok ülkede hızla artmaya başlamıştır (Yılmaz, 2006). Yoğurt, kimyasal bileşimi bakımından süte benzemekle beraber sütün bileşimine göre, besleyici değeri ve protein oranı açısından daha yüksek bir gıda maddesidir. Yoğurt, kalsiyum (Ca), fosfor (P), riboflavin, tiamin, vitamin B12, folat, niasin, magnezyum ve çinko kaynağı olmasından dolayı da sağlıklı beslenmede önemli bir yere sahiptir (Gahruie ve ark., 2015). Ayrıca, yoğurdun laktoz içeriği süte göre daha az olduğundan dolayı laktoz intoleransı olan insanlar da herhangi bir yan etki yapmadan yoğurt tüketebilirler (Gahruie ark., 2015; Brown-Riggs, 2016).

Probiyotik bakımından zengin olan yoğurt, bağışıklık sisteminin düzenlenmesini ve güçlenmesini sağlar. Yoğurt içerdiği A vitamini, B grubu vitaminleri, E vitamini, kalsiyum, fosfor, riboflavin, iyot, çinko sayesinde gastrointestinal bozukluklara ve hipertansiyona sebep olan kötü kolesterol ve kalp-damar hastalıkları gibi rahatsızlıklara karşı güçlü bir koruyucudur (Kalyenci, 2019).

Probiyotik bir süt ürünü olan kefir; birçok Avrupa ülkesinde olduğu gibi ülkemizde de bilinen bir fermente süt ürünüdür ve orijini Kafkas dağlarıdır. Kefir tanelerinden hazırlanan ana kültürün ya da kefir danelerinin süte katılmasıyla elde edilir (Şekil 2).



Şekil 2. Kefir Daneleri

Bu daneler; laktik asit ve asetik asit bakterilerini ve laktozu fermente eden ve edemeyen mayaları bir polisakkarit matriksi içinde kompleks laktoz ve kazein ile birlikte içermektedir. Kefirin kendine has tadı danedeki bakteri ve mayaların metabolik aktivitesi sonucu oluşmaktadır. Laktik asit ve alkol fermantasyonlarının bir arada yürümesi neticesinde son üründe oluşan karbondioksit, asetaldehit, asetoin, laktik asit ve etanol, kefirin taze, ferah ve ekşi tadını vermekte ve içindeki karbondioksit nedeniyle de köpüren bir özelliğe sahip olmaktadır (Ender ark., 2006). Kefir B-12, B-1 ve K vitamini ile folik asit bakımından zengindir (Sert vd., 2011). Mikroflorasında bulunan mayalar ve asetik asit bakterileri etkisiyle yüksek antibiyotik aktivite gösterdikleri için, bunların proteoliz aktiviteleri sonucunda serbest aminoasitleri, diğer protein hidroliz ürünleri ile B grubu vitaminleri bakımından zengin bir ürün haline gelmektedir (Karagözlü, 2003). Kefirin mikroflorası, sütü fermente ederek laktik asit, CO₂ az miktarda alkol, asetaldehit, aseton, diasetil oluşturarak, kefirin kendine özgü aroma ve kıvamının oluşmasına katkı sağlar (Fenderya ve Akalın, 2003; Özden, 2008; Sert vd., 2011; Karatepe ark., 2012).

Yüksek kalsiyum ve magnezyum içeriği ile birlikte kefir, karbonhidrat, yağ ve protein kullanımına yardım eden fosforun da iyi bir kaynağıdır (Sert vd., 2018). Başta laktoz intoleransında olmak üzere birçok mide ve barsak hastalıklarında, sinir sistemi rahatsızlıklarında, immün sisteminin güçlendirilmesinde hatta kanser hastalarına uygulanan çalışmaların belli dönemlerinde kullanılabilir (Yalçın ve Işık, 2017). Ötleş ve Çağındı, laktoz intoleransı (laktoz enzimi noksanlığı) görülen kişilerde yaptıkları çalışmalarında, laktoz tüketimine bağlı olarak görülen gaz ve ishal gibi sorunlarının kefir tüketimi sonunda ortadan kalkacağını bildirmişlerdir. Çünkü kefirde kırkın üzerinde probiyotik bulunurken yoğurta sadece iki probiyotik (*L. bulgaricus* and *S. thermophilus*) bakteri bulunmaktadır. Kefirde bulunan bakterilerin ürettiği laktazın, laktoz oranını azaltma özelliği yoğurttan fazladır. Bu nedenle kefir, laktoz intoleransı olan kişiler için ideal bir içecektir (Özden, 2008; Karatepe ve ark., 2012). Bu kısmen kefirde yüksek düzeyde seyreden ve sade yoğurttan yaklaşık %60 daha fazla olan β -galaktosidaz aktivitesi ile de açıklanabilmektedir. Süt içindeki tüm besin öğelerini içermesi ve kefir granüllerinin yapısında bulunan mikroorganizmaların etkisi ile besleyici değerinin artması ve vücut tarafından daha iyi yararlanılması kefirin önemini ortaya koymaktadır (Özden, 2008; Karatepe ve ark., 2012). Kefir süttten yapıldığı için, süt içindeki yağ, laktoz, mineral maddeler ve vitaminler gibi besin maddelerinin tümünü yapısında bulundurmaktadır. Mayalanma sırasında içerisinde çoğalan yararlı bakteri ve mayalar, vücuda giren zararlı mikroorganizmaların etkisini azaltabilmektedir. Özellikle bağırsak enfeksiyonlarına karşı etkilidir (Önay ve Akman, 2007). Kefire meyve eklenerek tüketilebildiği gibi soslara, çorbalara ve keklere ilave edilip pişirilerek de tüketilebilir (Özden, 2008; Karatepe ve ark., 2012).

Protein, vitamin ve mineral yönünden zengin bir besin olan tarhana toplum sağlığında dengeli beslenme açısından önem taşır. Çocuklar ve yaşlı insanların beslenmesindeki faydası üzerinde durulmaktadır (İbanoğlu ve ark., 1995; Dağlıoğlu, 2000; İbanoğlu ve Maskan, 2002; Tarakçı ve ark., 2004). Fermente ürün üretiminde uygulanan sıcaklık üründeki mikrobiyal kompozisyon üzerinde kilit rol görevindedir. Düşük sıcaklıklar ekşi hamurda heterofermantatif LAB türlerinin gelişimini teşvik eder iken; yüksek sıcaklıklarda homofermantatif türler baskındır. Maya türlerinin ideal gelişimleri ise düşük fermantasyon sıcaklıklarında gerçekleşir (Özel, 2021).

Yukarıda belirtildiği gibi fermantasyon prosesi hem ürün hem de ürünün sağlık açısından önemli olan probiyotik özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle bu araştırmada fermantasyon prosesinde yapılacak bazı modifikasyonlar ve bunların oluşturabileceği potansiyel etkiler üzerinde durulmuştur.

Araştırmamızda fermantasyon prosesi vakumda (düşük basınç ortamında) gerçekleştiğinde fermantasyon sürecinde değişimler meydana gelmektedir. Bu değişiklikler uygulanan teknolojiye ve basınca bağlı olarak olumlu yada olumsuz

etkisi olabilmektedir. Gıda teknolojisinde vakum uygulamaları kızartma, soğutma, pişirme, fırınlama ve kurutma proseslerinde kullanılmaktadır (Mariscal ve Bouchon, 2008; Palazoğlu ve ark., 2015; da Silva vd., 2017; Novotni vd., 2017; Ozturk vd., 2017; Belkova ve ark., 2018; Wang et al., 2018; Tuta Şimşek, 2020). Vakumun oluşması için ortamın sızdırmaz olması gerekmektedir. Gıdalarda ve ısıl uygulamalarda kullanılan en yaygın laboratuvar tipi makine vakumlu etüvdür. Vakumlu etüvde hem sıcaklık hem de vakum ayarı yapılabilmektedir (Şekil 3).



Şekil 3. Laboratuvar Tipi Vakumlu Etüv

Ortam basıncının düşmesi suyun kaynama noktasının düşmesine neden olduğu için gıda teknolojisinde proseslerde avantaj sağlanmaktadır. Literatürde ekmek hamurunda fermantasyon süresinin kısaltılması amacıyla ohmik ısıtma, ultrases, mikrodalga vb. alternatif teknolojilerden faydalandığı tespit edilmiştir (Ozmutlu ve ark., 2001; Gally ve ark., 2017; Luo ve ark., 2018). Tarhana üretiminin fermantasyon prosesinde vakum uygulamasının kullanılması ile ilgili bir çalışmaya literatürde rastlanmamıştır. Ürün çeşitliliğinin artırılması, toplum sağlığının olumlu yönde etkilenebilmesi, endüstriyel ölçekte üretim maliyetlerinin düşürülmesi vb. nedenlerle farklı katkı maddeleri ve üretim teknolojilerinin kullanılması amaçlanan geleneksel gıdalarımızdan tarhanaya kefir katkısı ve vakum fermentasyon uygulaması yapılabilir. Ayrıca, beslenme ve sağlık üzerine pek çok faydaları bulunan kefir kullanımının yaygınlaştırılması da böylece sağlanmış olacaktır. Bu uygulamaların yapılmasında proseslerde vakum

fermantasyon ile doğal fermentasyonların karşılaştırılması gerekmektedir. Ayrıca tarhana üretiminde tarhana hamurlarının hazırlanması aşamasında kefir ile yoğurt karışımının kullanımı fermentasyondan önce hali hazırda kefirde bulunan LAB'ların ve mayaların fermentasyon süresini kısaltacağı ayrıca ürüne fonksiyonel özellik kazandıracığı varsayılmaktadır. Kefirin ilave edilmesi hammaddelerin karıştırılma aşamasında olabileceği gibi fermentasyon esnasında da yapılabilir. Bu aşamalarda ilave edilen kefirlerin tarhananın özellikleri üzerine etkisinin incelenmesi gerektiği düşünülmektedir. Ayrıca, ilave edilen kefir miktarı, kefir de bulunan mikrobiyolojik yük son ürünün özellikleri üzerine de etkisi olacaktır.

Bu şekilde tarhanada fermentasyon prosesinde yapılacak olan bir modifikasyon ile sağlanacak faydalar ve elde edilecek kazanımlar aşağıda verilmiştir.

- Fonksiyonel özelliği (fenolik içerik) gelişmiş, duyuşal ve mikrobiyal kalitesi yüksek olan tarhana üretim yöntemi belirlenebilir.
- Tüm bu nedenlerle yoğurt ve kefir ile hazırlanan tarhana hamurlarına vakum fermentasyon ve doğal fermentasyon uygulanarak yaş ve kuru tarhananın bazı kalite kriterleri üzerine etkisi tespit edilebilir. Bu şekilde daha fonksiyonel daha besleyici ve daha çok sevilen tarhana üretim imkanına sahip olunabilir.
- Fermentasyon aşamasında vakum uygulamasının ve kefir ilavesinin tarhananın fermentasyon süresine, fizikokimyasal, duyuşal ve mikrobiyal üzerindeki olumlu ve olumsuz etkileri tespit edilebilir ve olumsuz etkilerin tolere edilmesi için alınması gereken önlemler tespit edilebilir.
- Tüketime hazır tarhananın potansiyel kullanıcıları; yemek şirketleri, gıda tedarikçileri, oteller, restoranlar, hastaneler, havayolu, demiryolu ve denizyolu ulaşım sistemleri, silahlı kuvvetler, marketler ve okullardır. Benzer araştırma ve geliştirme çalışmalarının artırılması, sağlıklı ve beslenmeye katkısı olan yarı hazır gıdaların kalite özelliklerinin geliştirilmesi, uzun vade de gıda sanayinde üretime geçmesi, üretim izinlerinin alınması ve aynı zamanda sağlık harcamalarının düşmesi de sağlanarak ülke ekonomisine katkı sağlayacak olması yaygın etki ve katma değer artışına neden olabilir. Ayrıca, beslenme ve sağlık üzerine pek çok faydaları bulunan kefir kullanımının yaygınlaştırılması da sağlanabilir.

KAYNAKLAR

- Arslan-Tontul, S., Mutlu, C., Candal, C., Erbaş, M., 2018. Microbiological and Chemical Properties of Wet Tarhana Produced by Different Dairy Products. *Journal of Food Science and Technology-Mysore*, 55(12):4770-4781.
- Belkova, B., Hradecky, J., Hurkova, K., Forstova, V., Vaclavik, L., Hajslova, J. 2018. Impact of vacuum frying on quality of potato crisps and frying oil. *Food Chemistry*, 241, 51-59.
- Bellici, A.E., Karasu-Yalçın, S., Eryaşar-Örer, K., and Yalçın, E., 2019. MALDI-TOF/TOF Mass Spectrometry for Determination of Yeast Diversity in Traditional Cornelian Cherry Tarhana Produced With Different Cereal/Pseudocereal Flours. *Annals of Microbiology*, 69(6):613-625.
- Bessmeltseva, M., Viiard, E., Simm, J., Paalme, T., Sarand, I., 2014. Evolution of Bacterial Consortia in Spontaneously Started Rye Sourdoughs During Two Months of Daily Propagation. *Plos One*, 9(4):95449.
- Blandino, A., Al-Aseeri, M.E., Pandiella, S.S., Cantero, D., Webb, C., 2003. Cereal-based Fermented Foods and Beverages. *Food Research International*, 36: 527–543.
- Bozoudi, D., Agathokleous, M., Anastasiou, I., Papademas, P., Tsaltas, D., 2017. Microbiological Characteristics of Trachanas, a Traditional Fermented Dairy Product from Cyprus. *Journal of Food Quality*, 1- 6.
- Brown-Riggs, C. 2016. Nutrition and Health Disparities: The Role of Dairy in Improving Minority Health Outcomes. *Int J Environ Res Public Health*, 13, 28. doi: 10.3390/ijerph13010028.
- Coşkun, F., 2014. Tarhananın Tarihi ve Türkiye’de Tarhana Çeşitleri. *Gıda Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 9: 69-79.
- Çevik, A. 2016. Tarhananın besinsel zenginleştirilmesinde kinoa, karabuğday ve lüpen unlarının kullanımı. Yüksek Lisans Tezi, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı, Konya, 113s.
- da Silva, F. L., de Lima, J. P., Melo, L. S., da Silva, Y. S., Gouveia, S. T., Lopes, G. S., Matos, W. O. 2017. Comparison between boiling and vacuum cooking (sous-vide) in the bioaccessibility of minerals in bovine liver samples. *Food Research International*, 100, 566-571.
- Dağlıoğlu, O., 2000. Tarhana as a Traditional Turkish Fermented Cereal Food, Its Recipe, Production and Composition. *Nahrung*, 44(2): 85-88.

- Ender, G., Karagözlü, C., Yerlikaya, O., Akbulut, N. 2006. Dünyada ve Türkiye'de tüketimi artan fermente süt içecekleri: Türkiye 9. Gıda Kongresi; 24-26 Mayıs 2006, Bolu 149.
- Erbaş, M. 2003. Yaş Tarhananın Üretimi ve Farklı Saklama Koşullarında Bileşimindeki Değişimler. Doktora tezi, Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Antalya.
- Ertaş, N. 2018. Effects of baker's yeast addition on some properties and phytic acid content of tarhana prepared with different cereal and legume products. *Food and Health*, 4(1), 9-18.
- Fenderya, S., Akalın, A.S. 2003. Probiyotik Yoğurtların Bazı Kimyasal Özellikleri Üzerine Bir Araştırma. *Ege Univ. Ziraat Fak. Derg* 2003;40(1):87-94.
- Fernandez-Garcia, E., & McGregor, J. U. (1994). Determination of organic acids during the fermentation and cold storage of yogurt. *Journal of Dairy Science*, 77(10), 2934-2939.
- Gahruie, H.H., Eskandari, M.H., Mesbahi, G., Hanifpour, M.A. 2015. Scientific and technical aspects of yogurt fortification: A review. *Food Sci Hum Wellness*, 4: 1-8. doi: 10.1016/j.fshw. 2015.03.002.
- Gally, T., Rouaud, O., Jury, V., Havet, M., Ogé, A., Le-Bail, A. 2017. Proofing of bread dough assisted by ohmic heating. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 39, 55-62.
- Georgala, A.I.K., Tsakalidou, E., Kandarakis, I. and Kalantzopoulos, G. 1995. Flavour Production in Ewe's Milk and Ewe's Milk Yoghurt, by Single Strains And Combinations of *Streptococcus thermophilus* and *Lactobacillus delbrueckii subsp bulgaricus*. *Lait*, 75:271-283.
- Göçmen, D., Gürbüz, O., Şahin, İ. 2003. Hazır Tarhana Çorbaları Üzerinde Bir Araştırma. *GIDA*, 28: 13-18. Gök, S.A., Ceyhun, A., and Yıldırım, F. 2017. Gastronomi Alanında Maraş Tarhanasının Değerlendirilmesi. *Aydın Gastronomi Dergisi*, 1(1):61-70.
- Gök, S. A., Sezgin, A. C., Yıldırım, F. (2017). Gastronomi alanında Maraş tarhanasının değerlendirilmesi. *Aydın Gastronomy*, 1(1), 61-70.
- Hayta, M., Alpaslan, M., Baysar, A. 2002. Effect of Drying Methods on Functional Properties of Tarhana: A Wheat Flour-Yogurt Mixture, *Journal of Food Science*, 67(2): 740-744.
- İbanoğlu, S., İbanoğlu, E, Ainsworth, P. 1999. Effect of Different Ingredients on The Fermentation Activity in Tarhana. *Food Chemistry*, 64:103–106.
- İbanoğlu, Ş., Elgün, A., Herkan, E.N., Türker, S., Ertay, N. 1995. The effect of fermentation condition on the nutrients and acceptability of tarhana, *Food Chemistry* 53(2), 143-147.

- İbanoğlu, Ş., Maskan, M. 2002. Effect of cooking on the drying behaviour of tarhana dough, a wheat flour yoghurt mixture, *Journal of Food Engineering* 54(2).
- Kalyenci, R. 2023. Yoğurdun Faydaları Nelerdir?", *Memorial.com.tr* , Ağustos 02, 2023. [Çevrimiçi]. Mevcut: <https://www.memorial.com.tr/saglikrehberleri/yogurdun-faydaları-nelerdir/>. [Erişim: Mart 16, 2024].
- Karagözlü, C. 2003. Fermente Bir Süt İçeceği: Kefir. EÜ Ziraat Fakültesi Süt Teknolojisi Bölümü Yayınları. 2003. İzmir.
- Karatepe, P., Yalçın, H., Patır B, Aydın I. 2012. Kefir ve Kefirin Mikrobiyolojisi. *Elektronik Mikrobiyoloji Dergisi TR* 2012;10(1):1-10.
- Kılıç, S. 2008. Süt Endüstrisinde Laktik Asit Bakterileri. *Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları*, 255s.
- Luo, D., Wu, R., Zhang, J., Zhang, K., Xu, B., Li, P., Li, X. 2018. Effects of ultrasound assisted dough fermentation on the quality of steamed bread. *Journal of Cereal Science*, 83, 147-152.
- Mariscal, M., Bouchon, P. 2008. Comparison between atmospheric and vacuum frying of apple slices. *Food Chemistry*, 107(4), 1561-1569.
- Novotni, D., Špoljarić, I. V., Drakula, S., Čukelj, N., Voučko, B., Ščetar, M., Ćurić, D. 2017. Influence of barley sourdough and vacuum cooling on shelf life quality of partially baked bread. *Food Technology and Biotechnology*, 55(4), 464.
- Ozmutlu, O., Sumnu, G., Sahin, S. 2001. Assessment of proofing of bread dough in the microwave oven. *European Food Research and Technology*, 212(4), 487-490.
- Ozturk, H. M., Ozturk, H. K., Koçar, G. 2017. Microbial analysis of meatballs cooled with vacuum and conventional cooling. *Journal of Food Science and Technology*, 54(9), 2825-2832.
- Ötleş S, Çağındı Ö. Kefir. 2003. A Probiotic Dairy Composition, Nutritional and Therapeutic Aspects. *Pakistan Journal of Nutrition*, 2(2): 54-59.
- Özbilgin, S. 1983. The chemical and biological evaluation of tarhana supplemented with chickpea and lentil., Ph. D. Thesis, Cornell University, Newyork, USA.
- Özdemir, N., Şimşek, Ö., Temiz, H., Çon, A.H. 2019. The Effect of Fermentation Time on The Volatile Aromatic Profile of Tarhana Dough. *Food Science and Technology International*, 25(3):212-222.
- Özdemir, S., Göçmen, D., Yıldırım-Kumral, A. 2007. A Traditional Turkish Fermented Cereal Food: Tarhana. *Food Reviews International*, 23:107–21.

- Özel, B. 2021, Yarı sürekli sistemde tarhana hamuru üretimi için aşılama materyali fermantasyonunun optimizasyonu, Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Özel, S., Sabanoğlu, S., Çon, A.H., Şimşek, Ö. 2015. Diversity and Stability of Yeast Species During the Fermentation of Tarhana. *Food Biotechnology*, 29(1):117-129.
- Palazoğlu, T. K., Coşkun, Y., Tuta, S., Mogol, B. A., Gökmen, V. 2015. Effect of vacuum-combined baking of cookies on acrylamide content, texture and color. *European Food Research and Technology*, 240(1), 243- 249.
- Saldamlı, İ. 1983. Beslenme açısından fermente süt ürünleri. *Gıda* 8(6): 297-311.
- Sert, D., Demirci, T., Akın, N. 2011. Probiyotik Süt Ürünü Kefir: Besinsel ve Terapötik Özellikleri. 1. Ulusal Helal ve Sağlıklı Gıda Kongresi. 19-20 Kasım 2011. Ankara.
- Settanni, L., Tangüler, H., Moschetti, G., Reale, S., Gargano, V., Erten, H. 2011. Evolution of Fermenting Microbiota in Tarhana Produced under Controlled Technological Conditions. *Food Microbiology*, 28(7):1367-1373.
- Şengün, İ.Y., Nielsen, D.S., Karapınar, M. 2009. Identification of Lactic Acid Bacteria Isolated From Tarhana, a Traditional Turkish Fermented Food. *International Journal of Food Microbiology*, 135(2):105-111.
- Şimşek, Ö., Özel, S., Çon, A. H., 2017. Comparison of Lactic Acid Bacteria Diversity During The Fermentation of Tarhana Produced at Home and on a Commercial Scale. *Food Science and Biotechnology*, 26(1):181-187.
- Şimşekli, N., Doğan, İ. S. (2015). Geleneksel ve fonksiyonel ürün olarak Maraş tarhanası. *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 5(4), 33-40.
- Tamer, C.E., Kumral, A., Aşan, M., Şahin, İ. 2007. Chemical Composition of Traditional Tarhana Having Different Formulation. *Journal of Food Processing and Preservation*, 31:116-126.
- Tamime, A.Y., Robinson, R.K., 1999. *Yoghurt: Science and Technology*. 2. Baskı, CRC Basımevi, Boca Raton, FL.
- Tarakçı, Z., Doğan, I. S., and Koca, A. F., 2004. A Traditional Fermented Turkish Soup, Tarhana Formulated with Corn Flour and Whey. *International Journal of Food Science and Technology*, 39:455-458.
- Tekgül, Y., Koç, G., Erten, E.S., Akdoğan, A. 2020. Determination of The Effect of Wheat Germ on The Mineral and Fatty Acid Composition and Aroma Compounds of Tarhana: a Traditional Fermented Cereal Food. *Journal of Food Processing and Preservation*, 45(2).
- Temiz, A., Pirkul, T. 1990. Farklı Bileşimlerde Üretilen Tarhanaların Kimyasal ve Duyusal Özellikleri. *Gıda* 16(1):7-13.

- Temiz, H., Tarakçı, Z. 2017. Composition of Volatile Aromatic Compounds and Minerals of Tarhana Enriched with Cherry Laurel (*Laurocerasus officinalis*). *Journal of Food Science and Technology-Mysore*, 54(3):735-742.
- Tuta Şimşek, S. 2020. Evaluation of Partial-Vacuum Baking for Gluten-Free Bread: Effects on Quality Attributes and Storage Properties. *Journal of Cereal Science*, 91, 1-7.
- Vasiee, A. R., Mortazavi, A., Tabatabaei-yazdi, F., 2018. Detection, Identification and Phylogenetic Analysis of Lactic Acid Bacteria Isolated From Tarkhineh, Iranian Fermented Cereal Product, by Amplifying The 16S Rrna Gene With Universal Primers and Differentiation Using Rep-PCR. *International Food Research Journal*, 25(1):423-432.
- Wang, J., Law, C. L., Nema, P. K., Zhao, J. H., Liu, Z. L., Deng, L. Z., Xiao, H. W. 2018. Pulsed vacuum drying enhances drying kinetics and quality of lemon slices. *Journal of Food Engineering*, 224, 129-138.
- Yıldırım, Ç., Güzeler, N. 2016. Tarhana Cipsi, Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi TARGİD Özel Sayı 1-8 2016.
- Yilmaz, L., Ozcan Yilsay, T., Akpınar Bayizit, A. (2006). The sensory characteristics of berry-flavoured kefir. *Czech journal of food sciences*, 24(1), 26.

12. Bölüm

4D Baskı ve Biyomalzemeler

Zülfü TÜYLEK¹

¹ Öğr. Grv., Malatya Turgut Özal Üniversitesi, Yeşilyurt MYO, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, Malatya/Türkiye, Orcid: 0000-0002-9086-1327, zulfu.tuylek@ozal.edu.tr

Giriş

4 boyutlu baskının (4DP) amacı, geleneksel 3 boyutlu baskı (3DP) araçlarını kullanarak akıllı şekil değiştiren ürünler sentezlemektir. 4DP'da dördüncü boyut "zaman" dır. Baskı sonrası, 3DP'lı yapı, belirli uyaranlara maruz bırakılarak ilgi duyulan şekle dönüştürülebilir. 4DP teknolojisi incelendiğinde hızla büyüyen bir teknoloji olduğu görülmektedir. Biyomedikal mühendisliği dâhil olmak üzere farklı birçok alanda araştırmaların yapıldığı görülmektedir. Biyomedikal mühendisliği alanında 4DP teknolojisinin uygulanmasına ilişkin ayrıntılı incelemeler her geçen gün artmaktadır. 4DP teknolojisindeki en büyük engellerden biri, bir uyarının varlığında hücrenel hayatta kalmaz. Hücrenel hayatta kalmayı desteklemek için uyarının iyi optimize edilmesi gerekir. Ayrıca pasif ve güvenilmez çalıştırma, deformasyonun ara durumlarını düzenlemedeki eksiklik ve malzemenin kullanılabilirliğindeki kısıtlamalar karşılaşılan zorluklardır. Gelecekteki çalışmalarda, tekniğin bu özel alanda kusursuz hale getirilmesi için uyarıların uygulanmasını yönetmek için daha etkili teknikler veya optimize edilmiş yöntemler gerekmektedir. 4DP, son zamanların en ilginç imalat tekniklerinden biri olarak ortaya çıkmıştır ve biyoloji, kimya, malzeme bilimi, mühendislik, sanat, endüstriler ve diğerleri gibi çeşitli araştırma alanlarında uygulamaları vardır [1].

4DP'yi temel alan çalışmaların yayın yıllarına göre dağılımı incelendiğinde, bu kavramın ne kadar yüksek bir ilgi çektiği görülmektedir: 4DP temelde 3DP ilkelerine dayanmakta ve diğer üç boyutun yanı sıra 'zaman' boyutunuda içermektedir. Görünüşte egzotik olan bu kavram artık bilim kurgu alanıyla sınırlı değil. Yükseklik, genişlik ve derinliğe ek olarak zaman, basılı ürün üzerinde uzamsal ve zamansal kontrol sağlar; 4DP'de zaman dördüncü boyut olarak adlandırılır. Çünkü bu yaklaşımda basılı ürünler dış uyaranlara maruz kaldıklarında zaman içinde şekil değiştirirler [2].

4DP, biyomateryaller ve hücreler içeren karmaşık yapıları yazdırırken 4 boyutlu biyo-baskı (4DBP) olarak kabul edilir. 4DP'nin 4DBP olarak kabul edilmesi için çeşitli koşullara uyması gerekir. Örneğin, basılan ürünün biyomedikal bir uygulama alanına sahip olması, ürünün baskısının implantasyon için biyouyumlu malzemelerden yapılmış olması vb. 4DBP teknolojisi, baskı sırasında canlı hücreleri insan vücuduna yüklemek için kullanılabilir. 4DBP zaman içinde yapısını, boyutunu ve işlevini değiştirebilir. 4DBP'lerin zaman içinde yapılarını, boyutlarını ve işlevlerini değiştirmeler gerekir. Bu değişiklikler genellikle fiziksel veya kimyasal bir uyarın gibi bir tür uyarın tarafından tetiklenir; 4DP ile elde edilebilen karmaşık şekil ve yapıların çoğunun 3DP ile geliştirilmesi neredeyse imkânsızdır [3].

Biyomedikal mühendisliğinde, 4DBP'ler doku mühendisliği, yara iyileşmesi ve ilaç dağıtımında geniş bir uygulama alanına sahiptir. 4DBP'lerin tipik bir örneği kontrollü ilaç dağıtımıdır. Bu durumda, ilaç 4DP ile bir kapsül içine doldurulur ve kapsül şeklinin deformasyonuna bağlı olarak belirli bir dokuya ulaştıktan sonra belirli bir uyarana altında salınır [4]. 4DP'nin bir başka örneği de kan damarlarının ve boru şeklindeki yapıların baskılanmasıdır. Başlangıçta düz bir biyolojik yapı oluşturulur ve uyarıldığında düz yapı boru şeklinde kan damarları oluşturmak üzere bükülür. Sentezlenen ürünün şekli ve işlevi 4DP'de kolayca programlanabilir. Bu, ürünün sonradan işlenmesi için ek donanım ve yöntemlere olan ihtiyacı ortadan kaldıran kullanılan malzemelerin zekâsı sayesinde mümkündür [5].

Bu, ürün üretim süresini kısaltır ve uygulama sürecine yardımcı olur. Örneğin, akıllı implantlar implantasyondan önce deneysel vücutta kompaktlık göstermiştir ve bu implantlar implantasyondan sonra belirli uyaranlara yanıt olarak kendi kendine organize olur ve gerekli karmaşık yapıları alır [6]. Malzeme bilimi, baskı teknolojisi ve ihtiyaca dayalı ürünlerdeki teknolojik gelişmeler, 4DP teknolojisine yönelik ilerleme ve talebin artmasına yol açmıştır. Bu nedenle bu bölüm, 4DP teknolojisi ve uygulamalarındaki son gelişmelere odaklanmaktadır. Ayrıca 3D'den 4D'ye geçişin evrimi, 4DP'yi etkileyen faktörler, 4DP'de kullanılan polimerler ve 4DP'nin uyaranlara yanıt verme yeteneği de büyük önem taşımaktadır.

3D BASKIDAN 4D BASKIYA EVRİM

3DP çok iyi kurulmuş bir baskı teknolojisidir. Başta biyomedikal mühendisliği olmak üzere mühendisliğin farklı alanlarında çeşitli amaçlarla uygulanmıştır [7]. Bu baskı sistemi, bilgisayar destekli tasarım kullanarak ürünleri sentezlemek için aşağıdan yukarıya bir yaklaşım kullanır. Teknoloji, bir seferde tek veya birden fazla malzemeyi katman katman basabilir [8]. Bu baskı yöntemi, uzamsal organizasyondan ödün vermeden hassas bir şekilde tanımlanmış 3D yapılar üretmek için her katmanın şeklinin kontrol edilmesine ve istiflenmesine olanak tanır; 3DP'deki gelişmeler ayrıca biyoyumlu malzemelerin ve bazı durumlarda canlı hücreler içeren doku yapılarının basılmasına da olanak tanıyacaktır [9]. Fonksiyonel yapay doku ve organlar, hayat kurtaran ilaçların taranması ve doku replasmanı gibi çeşitli tıbbi uygulamalarda kullanılmak üzere de hazırlanmaktadır [10]. Birçok avantajı ve uygulaması olmasına rağmen 3DBP teknolojisinin dezavantajları da vardır: 3DP ile basılan ürünler ilk şekilleriyle sınırlıdır, bu da onları statik ve cansız hale getirir. 4DP, 3DP'nin bu dezavantajının üstesinden gelmek için geliştirilmiştir. 4DP ek bir boyut ekler: zaman. Buradaki zaman, bir ürünün basılması için geçen

süreyi değil, 3D implantlar ve hücreler içeren bir doku yapısının dış uyaranların varlığında olgun bir forma dönüşmesi için geçen süreyi ifade eder [8]. 3D baskı ile 4D baskı arasındaki temel fark malzeme seçimidir. 4DP'de kullanılan malzeme en az bir akıllı özelliğe sahip olmalıdır. Tablo 1, 4DP'nin 3DP'ye göre temel avantajlarını listelemektedir.

Özellikler	3D baskı	4D baskı
Üretim süreci	2D kesitler, 3D yapı oluşturmak için katman katman istiflenir.	3DP ile aynı baskı prosedürünü izler, ancak yapının şekli ve işlevi dış uyaranların varlığında değişir.
Kullanılan malzemeler	Termoplastik polimerler, seramikler, metaller, biyomateryaller ve bunların kompozitleri	Belirli uyaranların varlığında zaman içinde özelliklerini ve işlevlerini değiştiren akıllı malzemeler (polimerler, seramikler, metaller, biyomalzemeler ve kompozitler)
Malzeme programlanabilirliği	Mümkün değil	Malzemelerin özellikleri ve işlevleri programlanabilir
Nesne şekli/işlevi	Zamanla istikrarlı	Belirli dış uyaranlara maruz kaldığında bir nesnenin şekil ve işlevinde zaman içinde meydana gelen değişiklikler
Uygulama alanları	Tıp, mühendislik, diş hekimliği, otomobiller, mücevherat vb.	Yapılandırmanın dinamik olarak değiştirilmesi gereken 3DP ile aynı

İki temel 4DP türü vardır. İlk tür, akıllı ürünler basmak için reaktif malzemelerin kullanılmasıdır. Bu tür malzemeler dış uyaranlara karşı duyarlıdır. Belirli bir uyaran aldığında, ürün kendini işlevsel bir forma dönüştürür. İkinci tür ise baskı sonrasında doku yapısının olgunlaşmasıdır. Bu türde yapı, canlı biyolojik hücreler içeren mürekkep kullanılarak basılır. Baskıdan sonra, yapı içindeki hücreler olgunlaşır, kendi kendine organize olur ve hücre dışı bir matris salgılamaya başlayarak belirli bir süre içinde işlevsel bir doku yapısı haline gelir. Bu baskı türü harici uyaran gerektirmez [11].

4D BASKIYI ETKİLEYEN FAKTÖRLER

Toz malzeme özellikleri, baskı parametreleri, yapıştırıcı türü ve miktarı ve sinterleme gibi bir dizi baskı sonrası işlem, ortaya çıkan ürünün mikro yapısını, yüzey pürüzlülüğünü ve mekanik özelliklerini etkiler. Bazı parametreler arasında katman kalınlığı, baskı hızı, toz serme yöntemi, yapıştırıcı doygunluğu, kuruma süresi ve ısıtıcı gücü yer alır. Katman kalınlığı, ürün özellikleri üzerinde en etkili parametrelerden biridir. Daha kalın bir katman kalınlığı, yüzey kalitesi ve boyutsal toleranslar üzerinde olumsuz bir etkiye sahiptir. Ayrıca tabakanın çok kalın olması durumunda toz yoğunluğu azalır. Yoğunluktaki azalma mekanik özelliklerde düşüşe neden olur [12]. 4DP temel olarak aşağıdaki altı faktörden etkilenir.

Katmanlı (Eklemeli) Üretim Süreci

Basılı ürünün uzamsal şekli, bilgisayar destekli tasarım/imalat şeklinde dijital bilginin gerekli olduğu eklemeli imalat sürecine girer. En yaygın kullanılan eklemeli üretim, kaynaşmış biriktirme modellemesidir (FDM). Stereolitografi (SLA)de eklemeli üretim için uygun bir diğerektir.4DP, baskı için kullanılan hassas malzemelerin eklemeli üretim süreciyle uyumlu olmasını gerektirir. Ürünün şekli ve işlevindeki farklılıkların malzeme özelliklerindeki farklılıklardan kaynaklanabileceği çok malzemeli ürünler için, seçilen eklemeli üretim yöntemi, mükemmel bir ürün oluşturmak için malzemelerin eşit olarak dağıtılmasını sağlamalıdır [13, 14].

Dış Uyarıcı

Dış uyaranlar 4DP'de önemli bir unsurdur. 4DP'de kullanılan hassas malzemeler dış uyaranların bir sonucu olarak şekillerini ve işlevlerini değiştirebilir. Bu nedenle yapı, ilk izlenimden sonra zaman içinde gelişir. İki tür dış uyaran vardır:

- Sıcaklık, elektrik ve manyetik alanlar gibi fiziksel uyaranlar
- pH ve nem gibi kimyasal uyaranlar [15].

Duyarlı Malzeme

Duyarlı malzemeler 4DP için gereklidir: dört boyutun katılımının görülebildiği vücut parçalarıdır. Duyarlı malzemeler, tekli veya çoklu uyaranlar altında belirli bir süre bastırıldıktan sonra şekil veya işlev değiştirebilir. Bükülme, kıvrılma, genişleme, daralma, bozulma ve renk değişimi gibi farklı tepki türleri ortaya çıkabilir [3].

Uyaranlar ve Duyarlı Malzemeler Arasındaki Etkileşim

Uygulamaya bağlı olarak, harici uyarıcı türü ve reaksiyona giren malzeme seçilmelidir. Uyarıcı ve reaksiyona giren malzeme arasındaki koordinasyon sonuçta ürünün nihai yapısını etkileyecektir. Bazı durumlarda, dönüşüm için uyarıcıya ek olarak ek işlemler gereklidir. Örneğin, akıllı malzemelere yönelik termal uyaranlar, kısıtlı termo mekanikte şekil hafızası etkileri sergiler. Bu gibi durumlarda, malzeme ilk olarak yüksek sıcaklıkların varlığında harici yüklemeye tabi tutulmalıdır. Daha sonra, malzemeye aynı yük uygulanırken sıcaklık düşürülür. Sıcaklık düşürüldükten sonra yük serbest bırakılır ve malzeme istenen şekli alır [16].

Malzemelerin Dönüşümü İçin Matematiksel Modelleme

4D etkilere sahip ürünlerin başarılı bir şekilde sentezlenmesi teorik ve sayısal modeller gerektirir. Bu modeller, uyarıcıların uygun maruz kalma sırasını tahmin etmek ve maruz kalma sürelerini işlevsellikle ilişkilendirmek için gereklidir. Bu modeller, sonlu elemanlar analizi (FEA) yoluyla yapı içinde istenen 3D uzamsal yönelimi ve malzeme dağılımını inceleyebilir ve farklı malzemeler ve farklı geometrik düzenlemeler için sistem davranışını tahmin edebilir [16].

Deformasyon Uyuşmazlığı

Deformasyon uyumsuzluğu 4DP'nin bir diğer önemli unsurudur. Bazı durumlarda, deformasyon uyumsuzluğu ile 4D ürünler elde edilebilir. Deformasyon uyumsuzluğu ile 4D ürünler elde etmek için, farklı fiziksel özelliklere sahip birkaç polimerin tek bir yapıda kullanılması gerekir. Örneğin, uyarıcıya duyarlı bir polimerden yapılmış iki katmanlı bir kiriş, termal uzama katsayısı her katman için farklıysa ısıya maruz kaldığında bir tarafa doğru bükülme eğilimi gösterecektir [17].

4D Baskı için Akıllı Malzemeler

4DP'de kullanılan malzemeler akıllı malzemeler olarak bilinir. Akıllı olarak adlandırılırlar çünkü sıcaklık, nem, pH, ışık, elektrik veya manyetik alanlar gibi dış uyaranlarla fiziksel veya kimyasal olarak değiştirilebilirler. Bu uyaranlar, akıllı malzemeler ve bunlardan üretilen cihazlar için önemli olan gerilme, eğilme, bükülme, yuvarlanma, şişme ve büzülme gibi makromoleküler hareketlerle sonuçlanır. Bu bölümde biyomedikal uygulamalarda kullanılan 4DP için en önemli akıllı yazdırılabilir malzemeler açıklanmaktadır.

Şekil Hafızalı Polimerler

Biyomedikal mühendisliğinde karmaşık doku şekilleri ve mikro yapılar üretme zorluğu, 3DBP'lerin keşfinden sonra aşılmıştır. Son zamanlarda, doku mikro çevresine yanıt verebilen ve buna göre şekillerini ve kimyasal özelliklerini değiştirebilen doku yapılarının ve iskelelerin geliştirilmesine yönelik ilgi giderek artmaktadır. Bu, uyarıcıya duyarlı akıllı malzemelerin 3DP ile birleştirilmesiyle elde edilebilir. Bu malzemelerin daha iyi patolojik tepki göstermesi, in vaziv cerrahi uygulamalarını azaltması ve kolay erişilemeyen yerlere implant yerleştirilmesine olanak sağlaması beklenmektedir [18]. Akıllı polimerler, belirli fonksiyonel gruplar içerdikleri için belirli uyaranlara karşı duyarlıdır. Buna ek olarak, polimer omurgası polarite veya yük gibi durum değişikliklerine de duyarlıdır. Bu nedenle, polimer içindeki kimyasal yapı değiştiğinde, tüm yapı gözle görülür şekilde değişir. 4DP'de kullanılan bu akıllı malzemeler şekil hafızalı malzemeler olarak bilinir. Şekil hafızalı malzemeler arasında metal alaşımları, seramikler ve polimerler bulunmaktadır. Şekil hafızalı malzemelerden imal edilen yapılar, şekil geri kazanımı, büyük deformasyon, şekil modifikasyonu ve şekil hafızalı sıcaklık düzenlemesi gibi birçok avantaja sahiptir [19]. Şekil hafızalı poliüretanlar yüksek bir şekil hafızası sıcaklık aralığına sahiptir ve biyouyumludur. Bu nedenle biyomedikal alanda büyük bir potansiyele sahiptirler. Bir diğer örnek şekil hafızalı malzeme, biyouyumluluğu, biyolojik olarak parçalanabilirliği ve hücre destek yetenekleri nedeniyle çeşitli biyomedikal uygulamalarda yaygın olarak kullanılan polikaprolakton (PCL)'dur. Diğer şekil hafızalı akıllı malzemeler de çeşitli biyomedikal cihazların hazırlanmasında kullanılmaktadır [20]. Tablo 2, farklı uyaranlara yanıt veren ve çeşitli biyomedikal uygulamalara sahip birkaç farklı polimeri göstermektedir.

Tablo 2. Farklı uyaranlara yanıt veren akıllı malzemeler [21 - 31].

Akıllı malzemeler	Yanıt	Uygulama
N,N-dimetilakrilamid, glikoz oksidaz, nanofibrillenmiş glikoz, selüloz, nanokil	Neme duyarlı malzeme	Biyomimetik mimari (doku mühendisliği ve biyomedikal cihazlar dâhil olmak üzere geniş bir uygulama yelpazesi için şekil değiştiren mimari).
Eudragit L100-55, polivinilpirolidon (PVP), teofilin	pH'a duyarlı malzemeler	Gecikmiş ilaç salınımı
Kolajen, aljinat		Kıkırdak doku mühendisliği
Kollajen, metakrilatlı jelatin (GelMA)		Anjiyojenik
Matris: poli (laktik asit) (PLA), benzofenon (BP), katkı maddesi: Fe3O4 NP	Manyetik duyarlı malzemeler	İntravasküler stent
Matris: üretan akrilat monomer, Katkı maddesi: Stronsiyum-ferrit ve karbonil demir tozu		Vücuttaki siliyer hareketi taklit eden biyomimetik aktüatörler
Matris: üretan diakrilat, izobornil akrilat katkı maddesi: modifiye alümina trombositleri		Geniş uygulama yelpazesi için biyoilhamlı kompozitler
Matris: TangoBlack plus ve Verowhite, lifler: DM8530, DM9895	Şekil hafızalı polimer kompozit malzemeler	Çok çeşitli Biyomedikal cihazların hazırlanması için ayarlanabilir yapılar
Şeffaf FLGPCL04, esnek FLFLGR02 çelik fiberler, füme silika		İlaç teslimi
Pluronik F127	Termo duyarlı malzemeler	Programlanabilir vaskülarize doku yapısı
Polilaktik asit (PLA) ve çok duvarlı karbon nanotüpler (MWCNT'ler)	Işığa duyarlı malzemeler	Biyomimetik akıllı aktüatörler ve yumuşak robotlar
Poliüretan (PU), karbon siyahı parçacıkları		Geniş uygulama yelpazesi için biyomimetik akıllı cihazlar
PLGA/altın nanoçubuklar		Programlanabilir ilaç dağıtım cihazları
BMA, PEGDMA, TPO PCL	Kendi kendini onaran malzemeler	Stent

Şekil hafızalı alaşımlar (SMA)

Şekil hafızalı alaşımlar, yüklere veya sıcaklık değişimlerine maruz kaldıklarında tek başlarına veya kombinasyon halinde şekil değiştirebilen bir grup akıllı malzemedir. Bu malzemeler, uyarım altındaki büyük deformasyonlardan orijinal şekillerine geri dönebilirler [32]. Son yıllarda SMA'lar, mühendislik ve tıp sektörleri de dâhil olmak üzere çeşitli sektörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Biyomedikal sektöründe en yaygın olarak kullanılan SMA, genellikle Nitinol olarak bilinen ikili sistem Ni-Ti' dir. Nitinol ilk olarak 1960'larda keşfedilmiştir ve %50 nikel ve %50 titanyumdan oluşmaktadır [33]. SMA'nın (Nitinol) ilk biyomedikal uygulaması. Nitinolün psödo elastik özellikleri ortodontik tellerin sentezlenmesinde kullanılmıştır. SMA'nın psödo elastik davranışından, alt çenede ortodontik aşırı kalabalıklaşma için kullanılan ortodontik distraktörlerin sentezlenmesiyle daha fazla yararlanılmıştır. Daha yakın zamanlarda, stentler, kılavuz teller ve implantlar gibi SMA bazlı mekanizmalar nöroloji, ortopedik cerrahi ve kardiyoloji gibi biyomedikal alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır.

Şekil Hafızalı Kompozitler

SMP ve SMA tek başına kullanıldığında, fiziksel özellikleri sınırlıdır. Bu sınırlamanın üstesinden gelmek için araştırmacılar SMP ve SMA'yı karıştırarak şekil hafızalı kompozitler (SMC'ler) üretmeye çalışmışlardır. Örneğin araştırmacılar biyomedikal stent olarak kullanılabilir yapılar oluşturmak için naylon (SMP) ve nitinol (SMA) karıştırılarak ısıya duyarlı SMC'lerin sentezlendiğini bildirmişlerdir. SMC'lerin naylon (SMP) ve nitinol (SMA) karışımından yapıldığını bildirmişlerdir [34]. Bununla birlikte, şekil hafızalı malzemelerin, özellikle SMA ve SMC'lerin genel performansında iyileştirme için hala yer vardır. Çoğu şekil hafızalı malzemenin, hızlı deformasyonla düşük geri kazanım hassasiyeti, yapının oldukça düşük geri kazanım gücü, hafıza etkisini yeniden üretmede zorluk ve düşük mekanik mukavemet ve kimyasal stabilite gibi çeşitli dezavantajları vardır. Bu nedenle, şekil hafızalı malzemeler üzerindeki araştırmaları ilerletmek için, işlevlerini optimize etmek ve performanslarını artırmak amacıyla moleküler tasarım ve malzeme modifikasyon tekniklerine önem verilmesi gerekmektedir. Biyomedikal alanda kullanılan şekil hafızalı malzemeler vücut sıcaklığına yakın ısıya dayanıklıdır, biyoyumludur, düşük toksisiteye sahiptir veya hiç toksisitesi yoktur ve hatta biyolojik olarak parçalanabilir [35, 36].

Şekil hafıza etkilerinin türleri

4DP'de kullanılan malzemeler şekil hafızası etkisine (SME) sahip olmalıdır. Bir şekil hafızalı malzemenin SME'si, belirli dış uyaranların varlığında geçici bir durumdan programlanmış bir duruma geri dönme yeteneği olarak tanımlanabilir. SME iki adımda elde edilebilir. İlk adım, malzemenin geçici bir duruma deformasyonu ve ardından belirli bir uyaranın varlığında programlanmış şekle ulaşan bir şekil kurtarma adımındır. Ürünün deformasyon hızı, malzemenin hassasiyetine ve şekline bağlıdır. Üç tür şekil hafızası etkisi vardır. Bunlar aşağıdaki gibidir.

Tek yönlü şekil hafıza etkisi.

Çoğu şekil hafızalı akıllı malzeme tek yönlü şekil hafıza etkisi gösterir. Bu durumda, malzeme uyarıldığında orijinal durumundan programlanmış bir duruma deforme olur ve bu programlanmış durum kalıcı hale gelir. Ek bir programlama adımı olmadan orijinal duruma tekrar ulaşılamaz.

Çift yönlü şekil hafızası etkisi

Bazı şekil hafızalı akıllı malzemeler çift yönlü bir şekil hafıza etkisi sergiler. Bu tür malzemeler iki farklı şekli hatırlar. Bir uyarıcıya maruz kaldığında orijinal durum programlanmış duruma dönüşür ve bu değişim tersine çevrilebilir. Uyarıcı kaldırıldığında, programlanmış durum orijinal duruma geri döner ve bu tersine çevirme işlemi ek bir programlama gerektirmez [37].

Üç yönlü şekil hafızası etkisi

Üç yönlü şekil hafızası etkisinde, orijinal durum ile programlanan durum arasında bir ara durum vardır. Orijinal ve programlanmış durumlar arasında birden fazla durum varsa, bu çok yönlü şekil hafızası etkisi olarak adlandırılır. Üç yönlü şekil hafızası etkisi, farklı camı geçiş (Gt) sıcaklıklarına sahip çift yönlü şekil hafızalı polimerlerin bir araya getirilmesiyle veya akıllı malzemelerin Gt ve ardından erime geçiş sıcaklığının üzerinde ısıtılmasıyla elde edilebilir [38].

Uyaranlara Karşı Duyarlılık

Akıllı malzemeler belirli uyaranlara karşı duyarlıdır. Uyaranların varlığında, akıllı malzemeler orijinal hallerinden dönüşür ve programlanmış, kalıcı veya tersine çevrilebilir bir forma dönüşür. Genel olarak fiziksel, kimyasal ve biyolojik uyaranlar olarak sınıflandırılacak çeşitli uyaran türleri vardır.

Fiziksel Uyarılar

Fiziksel uyarılar sıcaklık, ışık, nem, elektrik ve manyetik alanları içerir. Bu uyarıcılar esasen polimer zincirlerinin mekaniğini ve uyarıcıya duyarlı malzemenin atomlarının iç paketleme organizasyonunu değiştirerek ürünün şeklini değiştirir. Fiziksel ve çevresel uyarılar yoluyla şekil değişiklikleri malzemelere benzersiz özellikler kazandırarak biyomedikal bilimlerdeki uygulama alanlarını genişletir.

Sıcaklık

Sıcaklık, 4DP ürün geliştirmeye yönelik birçok deneysel çalışmada genellikle harici bir uyarıcı olarak kullanılır. Şekil hafızalı malzemeler 4DP'de yaygın olarak kullanılmaktadır. Baskıdan sonra, şekil hafızalı malzemeler, meta stabil geçici bir şekil elde etmek için belirli koşullara yanıt olarak deforme olur. Geçici şekil daha sonra bir toparlanma aşamasıyla istenen şekle deforme edilir. Sıcaklığa duyarlı 4DP'ler söz konusu olduğunda, insan vücudunun sıcaklığı (37°C) bir uyarıcı kaynağı olarak kullanılabilir. Sıcaklığa duyarlı 4DP'de iki tür polimer kullanılır. Bunlar şekil hafızalı malzemeler ve duyarlı polimer çözeltileridir [39].

Duyarlı polimer çözeltileri, polimer ve çözücü arasındaki hidrofobik ve hidrofilik etkileşimleri yumuşatan kritik çözelti sıcaklıklarına sahip kopolimerler içerir. Sıcaklıktaki değişiklikler bu etkileşimlere müdahale eder ve polimerin çökmesine neden olur. Hidrojeller söz konusu olduğunda, bu etkileşim sırasıyla zincir genişlemesi veya çökmesi nedeniyle şişmeye veya büzölmeye yol açar. Sıcaklığın harici bir uyarıcı olarak kullanıldığı bazı 4DBP örnekleri Tablo 3'te özetlenmiştir.

Tablo 3. Isıya duyarlı akıllı malzemeler [40 - 42].

Malzeme	Yanıt	Uygulama
Polilaktit/ağırlıkça %15 hidroksiapatit	Sıcaklığa duyarlı	Kendiliğinden oturan küçük kemik defekti implantı
Metakrilatlanmış poli(kaprolakton)		Trakeal stent
Poli(hidroksil etilakrilamid-ko-Nisopropilakrilamid) (P(HEAm-co-NIPAm) ve P(HEAmco-NIPAm)/PNIP Am hidrojenleri		Sensör
Poli(N-izopropilakrilamid)		Valfler, mikroakışkanlar
Metakrilatlanmış poli (etilen oksit) – poli (propilen oksit) – poli (etilen oksit) triblok kopolimerlerinden oluşan ısıya duyarlı hidrojenler		Akıllı vanalar, aktüatörler
Poli(N-izopropil-lakrilamid) ve poli(kaprolakton)'dan yapılmış iki katmanlı yapıyı kullanarak kendi kendine katlanma ve kendi kendine açılma yeteneği		Hücre kapsülleme ve salım çalışmaları
Poli(propilen fumarat) içindeki ısıya duyarlı poli(N-izopropil lakrilamid-ko-akrilik asit) menteşeleri		Kontrollü ilaç salınımı

Işık

4DP'de kullanılan bazı malzemeler ışığa duyarlıdır, yani ışığa maruz kaldıklarında kimyasal ve fiziksel değişikliklere uğrarlar. Fotostimülasyonun kullanımı, sürdürülebilirlik, iyi odaklanma ve hızlı anahtarlama gibi çeşitli avantajları nedeniyle araştırmacıların ilgisini çekmektedir. Fotostimülasyon polariteyi, bağlanma gücünü, konformasyonu, hidrofilitiyi, bozunabilirliği ve optik özellikleri değiştirir. Işığa duyarlı malzemeler, ışığa maruz kalma miktarını ayarlayarak kuvvetler temassız bir şekilde kolayca kontrol edilebildiğinden, özellikle uzaktan uygulamalar için kullanılabilir. Işığa duyarlı malzemeler spirooksazin, fulgit, azobenzen, spiropiran veya diat iletken gibi ışığa duyarlı bir yan zincire veya kromofora sahip olmalıdır [43].

Kromoforun türü, malzemenin tersinir ve tersinmez dönüşümünü belirler. Geri dönüşümsüz ışığa duyarlı malzemeler ışık tarafından bozulur ve bu nedenle ilaç dağıtımı için kullanılabilir. 4D'de kullanılan ışığa duyarlı malzemeler ve uygulamaları Tablo 4'te listelenmiştir.

Tablo 4. Işığa duyarlı akıllı malzemeler [44, 45].

Malzeme	Yanıt	Uygulama
Poli(etilen glikol) diakrilat (PEGDA)	I ş ı ğ a D u y a r l ı	Origami ile ilgili yapı
Poli-laktik-ko-glikolik asit PLGA/Altın nanoçubuklar		Programlanabilir ilaç dağıtım cihazları
Poliüretan (PU), karbon siyahı parçacıkları		Biyomimetik akıllı cihazlar, yumuşak robotlar
Benzil ve alkil kama tipi monomerden oluşan dendritik blok kopolimer		Kendini benimseyen akıllı optik cihazlar
Polilaktik asit (PLA) ve çok duvarlı karbon nanotüpler (MWCNT'ler)		Biyomimetik aktüatörler ve yumuşak robotlar
C6M, C6BP, C6BPN, A3MA ve DR1A		Mikro aktüatörler

Nem/Sıvı

İnsan vücudunun yüzde 60'ı sudan oluşur. Vücutta su, hücre içi veya hücre dışı sıvı olarak bulunur. Bu nedenle su, akıllı dönüşüm için harici bir uyarıcı olarak hareket edebilir. Mekânsal ve zamansal olarak bir birine bağlı olarak, bir uyarıcı olarak suyun varlığında, 4D baskılı yapının farklı bölümlerinde çeşitli şişmeler meydana gelir. Suya duyarlı malzemelerin ilaç salınımı, hücre kapsülleme ve akıllı valfler dâhil olmak üzere birçok uygulaması vardır. Bununla birlikte, suya duyarlılığın çeşitli sınırlamaları da vardır. Bunlardan en önemlileri yavaş tepki süreleri, zayıf mekanik özellikler ve hızlı bozulmadır. Bu malzemeler çeşitli şişme-büzülme döngüleriyle karşı karşıya kaldıklarından, hızlı bozulma malzemenin hizmet ömrünün kısalmasına neden olur. Bu nedenle bu malzemeler kullanım süresine göre seçilmelidir [46]. Tablo 5'te suya duyarlı malzemelere ve uygulamalarına ilişkin bazı örnekler listelenmektedir.

Tablo 5. Nem/Sıvıya duyarlı akıllı malzemeler [47 - 49].

Malzeme	Yanıt	Uygulama
Farklı ozmolaritelere sahip iki tabaka lipit damlacığı (1,2-difitanoil-sn-glisero-3-fosfolin) Suyun varlığında küre oluşturacak şekilde katlanan çiçek şeklindeki yapı	N e m / S ı v ı y a d u y a r l ı	Hedefli ilaç dağıtımı, hücre kapsülleme
N,N-dimetilakrilamid, glikoz oksidaz, glikoz, nanofibrillenmiş selüloz, nanokil		Biyomimetik mimariler
Poli(etilen glikol) bazlı iki katmanlı hidrojel Kendiliğinden katlanır silindirik iskeleler		İnsülin üretimi için hücre kapsüllemesi
Karboksimetil selüloz hidrokolloid hidrojel Suyu duyarlı, tersine çevrilebilir yapı		Doku mühendisliği
Poli(etilen glikol) diakrilat hidrojel yapısı Su varlığında yapının bükülmesi		Akıllı sensör
Çok katmanlı poli(glisero sebakat) şerit		Kendinden aktüatörler, organik solventlere duyarlı sensör

Manyetik alan

Manyetik alana duyarlı malzemelerin biyomedikal alanda kullanımı 2600 yıl kadar önce rapor edilmiştir. Günümüzde manyetik alanlar, manyetik rezonans görüntüleme ve hedefe yönelik ilaç dağıtımı da dahil olmak üzere çok çeşitli biyomedikal uygulamalarda kullanılmaktadır [50].

Bir başka çalışmada, polilaktasit polimer çözeltisi ile karıştırılmış manyetik demir oksit nanopartiküllerinden oluşan kompozit bir mürekkep kullanılarak manyetik alana duyarlı bir damar içi stent hazırlanmıştır. Hazırlanan ürün, manyetik alan varlığında şeklini geri kazanma özelliğine sahiptir. Bu çalışmada, manyetik demir oksit, geçici şekli gerçek şekline geri döndürmek için ısı şeklinde istenen miktarda enerji üretmek üzere alternatif bir manyetik alan varlığında ısıtılmıştır. Başka bir çalışmada, demir nanopartiküllerle güçlendirilmiş bir matris olarak poli(dimetilsiloksan) (PDMS) kullanılarak hızlı manyetik alana duyarlı yapılar üretilmiştir [51]. Yapıların tepkisi, yapıdaki demir nanopartiküllerin varlığı nedeniyle hızlıydı, çünkü manyetik alan olsun ya da olmasın anında manyetizasyon kazanıyor yada kaybediyorlardı. Üretan akrilat monomer, stronsiyum ferrit ve karbonil demir tozu karışımından sentezlenen kompozit bir mürekkep kullanarak manyetik alana duyarlı bir biyomimetik aktüatör hazırlandı. Manyetik tepki, kendi kendine katlanan yapılar içinde kullanılabilir. Manyetik dipol desenli PDMS elastomer levhalar, kendi kendine

katlanan yapılar imal etmek için sentezlenmiştir [52]. Yapıların kendi kendine katlanması, elastik bükülme enerjisi ve harici bir manyetik alan varlığında gerçekleştirilmiştir. Akıllı yapılar, yapı içindeki manyetik nanoparçacıkların yönelimi ve dağılımı farklı olduğunda ortaya çıkmaktadır. Diferansiyel yönelim ve dağılımdan yararlanarak bu yapılar, kasların çok hızlı deformasyonlarının ortaya çıkması ve kaybolmasıyla kas yapılarının hazırlanması gibi çeşitli uygulamalar için kullanılabilir. Bu yapılar ayrıca manyetik alan olsun ya da olmasın deformasyonların çok hızlı bir şekilde ortaya çıkmasını ve kaybolmasını sağlayabilir.

Biyomedikal uygulamalar için manyetosensitif malzemelerin kullanımının çeşitli avantajları olsa da, bunların toplanma eğilimleri ve reaktiviteleri ile ilgili endişeler devam etmektedir [53].

Manyetiğe duyarlı malzemelerin kullanımıyla ilgili bir diğer endişede manyetik alanın frekansıdır. Frekans biyolojik açıdan güvenli aralıkta (50-100 kHz) olmalıdır, aksi takdirde sıcaklık artışları meydana gelecek ve vücutta travma oluşacaktır. Bu nedenle, bu dezavantajları koruyan manyetosensitif malzemeleri tanıtmak için yoğun araştırmalara ihtiyaç vardır [54].

Elektrik alanı

Elektrik alanlarının biyomedikal uygulamalarda yaygın olarak kullanıldığı iyi bilinmektedir. Spesifik oryantasyonu (elektrotropizm) artırmak ve yönlü hücre hareketliliği sağlamak için elektrik alanlarının kullanılması, araştırmacılar tarafından oldukça takdir edilen konulardan biridir [55]. Bir başka çalışmada, 3D baskılı iskeleler pluronik F127 ve anilin tetramer konjuge polietilenimin karışımından üretilmiş ve dokuyu uyarmak için yüksek iletkenlik göstermiştir [56]. Çok farklı bir çalışmada, iskelet kası hücreleri ile yüklü 3D baskılı poli(etilen glikol) diakrilat hidrojel üretilmiş ve elektriksel uyarım varlığında hareket etme kabiliyeti göstermiştir [57]. Nöronal hücreler elektro-duyarlı olduğundan ve elektrik stimülasyonu altında farklılaşmaya uğradığından, iletken iskeleler sinir sisteminin rejenerasyonuna yaygın olarak uygulanabilir.

Bununla birlikte, elektrik stimülasyonu, akım uygulandığında lokalize ısınma, hücre ölümü ve membran bozulması gibi sorunlara neden olabilir. Bu nedenle, elektrik stimülasyonu kullanılırken iyi ayarlanmış çalışma ve önlemlerin alınması gerekir.

Kimyasal Uyarılar

İyonik konsantrasyon ve pH önemli fizyolojik parametrelerdir ve vücutta bunlar arasındaki herhangi bir dengesizlik kardiyovasküler hastalıklar, enfeksiyonlar, nöro dejeneratif hastalıklar ve çeşitli kanserler dahil olmak üzere

bir dizi hastalığa yol açabilir. Bu nedenle, kimyasal olarak hassas malzemeler tasarlanırken pH ve iyonik konsantrasyon dikkate alınmalıdır.

pH

pH'a duyarlı ürünler polielektrolit polimerlerden yapılabilir. Polielektrolit polimerler, pH'daki değişikliklere yanıt olarak proton kabul eden veya veren zayıf asidik veya bazik gruplara sahiptir. Polimerlerde bulunan tersiyer aminler, sülfonik asit grupları, karboksil grupları, fosfat grupları ve piridin grupları gibi çeşitli gruplar, pH'daki değişikliklere yanıt olarak iyonlaşarak bileşimlerini, bozunabilirliklerini, zincir yapısının şişmesini, büzülmesini, çözünürlüklerini, kendi kendine birleşmelerini ve yüzeye ktivitelerini etkiler. Malzemelerin pH hassasiyeti, gen iletimi, glikoz sensörleri ve ilaç iletimi dâhil olmak üzere çeşitli biyomedikal uygulamalar için kullanılmıştır [58]. Kanser ve enflamasyon, doku mikro çevresinde pH değişikliklerine neden olur. Gastrointestinal sistemde bir pH gradyanı vardır. Bu durum, ilaçların hastalık bölgelerine kontrollü bir şekilde iletilmesi ve organa özgü oral ilaçların periyodik olarak salınması için pH'a duyarlı malzemelerin kullanılmasına yol açmıştır [59]. pH'a duyarlı malzemeler küresel formdan sarmal forma doğru bir değişim gösterir. Sarılma, yüklü fonksiyonel grupların elektrostatik itmesinden kaynaklanır. Fonksiyonel gruplar üzerindeki yük nötralize edildiğinde, sarmal yapı küresel bir şekle geri döner [60]. pH'a duyarlı polimerler iki tiptir: sentetik ve doğal polimerler. Poli(L-glutamik asit) (PGA), poli(histidin) (PHIS) ve poli(akrilik asit) (PAA) pH'a duyarlı sentetik polimerlere örnek teşkil ederken, kitosan, hyaluronik asit, jelatin, aljinik asit, kolajen ve dekstran pH'a duyarlı doğal polimerlerdir. pH'a duyarlı madde örnekleri ve bunların biyomedikal uygulamaları Tablo 6'da listelenmiştir.

Tablo 6. pH'ya duyarlı akıllı malzemeler [61 - 63].

Malzeme	Yanıt	Uygulama
Kolajen, aljinat	P H ' a D u y a r l ı	Kıkırdak doku mühendisliği
Eudragit L100-55, polivinilpirolidon (PVP), teofilin		Gecikmiş ilaç salınımı
Kollajen, metakrilatlı jelatin (GelMA)		Anjiyogenezi teşvik eden iskeleler
Keratin		İlaç teslimi
Kolajen ve kitosan		İlaç teslimi
Keratin hidrojel içinde kapsüllenmiş ZnO nanoparçacığı		İlaç teslimi
akrilik asit bazlı hidrojel		Daha hızlı ilaç salınımı
Polivinilpirolidon ve metakrilik asit kopolimeri kullanan çekirdek-kabuk konfigürasyonuna sahip tabletler		Enterik ilaç salınımı
Jel-derm		Bakteriyel enfeksiyon göstergesi (pH'a bağlı renk değişimi) ve ilaç salınımı
Akrilonitril-bütadienstiren ile güçlendirilmiş poli(2-vinilpiridin) hidrojen		Dinamik akış kontrolü

pH'a duyarlı doğal polimerlerin bir sınırlaması da doğal olarak zayıf mekanik özellikleridir. Mekanik özellikler, doğal polimerlerin sentetik polimerler ve diğer malzemelerle karıştırılmasıyla geliştirilebilir. Sentetik polimerler için uygulamalar iyi bir şekilde oluşturulmuştur, ancak pratik uygulamadan önce biyolojik olarak parçalanabilirliği, yapısal kararlılığı ve maliyet etkinliğini sağlamak için daha fazla araştırmaya ihtiyaç vardır.

İyonik Konsantrasyon

İyon konsantrasyonu organizmanın en önemli fizyolojik parametrelerinden biridir. Bununla birlikte, çok az sayıda çalışma iyonik gücü 4D baskı için bir uyarıcı olarak kullanmıştır. Bu çalışmalar çoğunlukla değişen tuz konsantrasyonu ile elde edilen baskı sonrası ürünün şekil gelişimini göstermektedir. Örneğin, potasyum 3-sülfopropilmetakrilat bazlı hidrojeller, iyonik veya tuz konsantrasyonundaki değişikliklere yanıt olarak kendiliğinden şişme gösteren

yapıları basmak için mürekkep olarak kullanılmıştır [64]. Yapılan başka bir çalışmada polistiren-b-kuaternize poli (2-vinilpiridin) bazlı mürekkepler fotonik katman filmleri basmak için kullanılmıştır. Bu çalışmada üretilen yapılar, alan aralığı ve kırılma indisi ayarlanarak cilt izleme uygulamaları için iyon konsantrasyonu ile aktive edilen şişme/şişme davranışı sergilemiştir. Bir başka çalışmada, yapıları basmak için poli(akrilamid-ko-bütül metakrilat), poli(metakrilik asit) ve poli(N-izopropilakrilamid) kullanılarak iyon konsantrasyonuna duyarlı kompozit hidrojel sentezlenmiştir [65]. Tuz konsantrasyonu 1,5 M olarak değiştirildiğinde, yapı tambur şekline dönüşmüştür. Fizyolojik elektrolit seviyeleri, genellikle fark edilmedikleri ve daha sonra komplikasyonlara yol açan hastalık durumlarını gösterebildikleri için büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle, biyoloji ve malzeme bilimi arasındaki işbirliği, özellikle de dalgalanan iyon konsantrasyonlarına duyarlı malzemeler, bu hastalıklar için alternatif tedavi seçeneklerine yol açabilir.

Biyolojik Uyarılar

Vücuttaki neredeyse tüm biyolojik süreçler geri bildirim döngüsü benzeri iletişim yoluyla gerçekleşir. Bu iletişim proteinler, DNA, peptitler, glikoz ve enzimler gibi biyolojik mikro ve makromolekülleri içerir. Spesifik işlevsellikler sergileyen ve farklı biyolojik uyarılara yanıt verme yeteneğine sahip malzemeler üzerinde çeşitli çalışmalar yapılmıştır.

Enzimler

Enzimler spesiflikleriyle bilinirler ve hücre yapışması, protein ekspresyonu ve proteoliz gibi çeşitli biyolojik süreçler enzim kontrolü altındadır [66]. Canlı organizmalarda bulunan çok çeşitli enzimler nedeniyle, enzime duyarlı malzemeler araştırmacıların dikkatini çekmiştir. Enzime duyarlı malzemelerin avantajı, biyolojik sistemin kendisi tarafından uyarılabilmesi ve uyarımın yoğunluğunun fizyolojik işleve göre kendiliğinden kontrol edilebilmesidir. Örneğin, matriks metalloproteinaz enzimlerine (MMP'ler) tepki veren ilaç yüklü hidrojel sentezlemiştir [67]. MMP'ler tümör istilası veya metastaz durumlarında aşırı eksprese edilir. Bu nedenle MMP'lerin varlığı, hidrojel MMP'lerin varlığında enzimatik olarak bozduğunda negatif yüklü hidrojellerden ilaçların salınması için bölgeye özgü bir biyolojik işaret sağlar. Ayrıca, ilaç dağıtımı için manyetik olarak harekete geçirilen jelatin metakrilat bazlı mikrofloatlar geliştirmişlerdir. Bu mikrofloatların kolajenaz ve MMP2 enzimlerinin varlığında toksik bileşenler bırakmadan tamamen bozduğu gösterilmiştir [68]. İlaç iletiminin yanı sıra, enzime duyarlı yapıların, yaralı dokunun rejenerasyonundan sonra dokuya özgü enzimler tarafından kademeli

olarak parçalandıkları için doku mühendisliğinde de yararlı olduğu bulunmuştur. Örneğin, anjiyogenezi teşvik etmek için mikro kanallar üretmişlerdir [69]. Mikro kanallar proteolitik enzimler için substratpeptitlerle gömülmüştür. Substrat peptidin bozunmasından sonra, hücreler mikro kanallara tohumlandığında anjiyogenezi teşvik edilir. Yapının dokuya başarılı bir şekilde entegre edilmesi için kaplama gerekliydi. Doku mühendisliğinin yanı sıra, enzime duyarlı malzemeler yapıların şişmesi ve kabarması ve yüzey özelliklerinin iyileştirilmesi içinde yararlıdır. Enzime duyarlı malzemelerle ilgili temel endişe, vücutta bulunan diğer enzimlerle istenmeyen çapraz reaktivitenin ortaya çıkmasıdır [70].

Glikoz

Vücuttaki glikoz konsantrasyonu yaşamın sürdürülmesinde önemli bir faktördür. Vücudun glikoz konsantrasyonundaki bir dengesizlik, diabetes mellitus olarak bilinen ciddi bir hastalığa yol açabilir. Glikoza duyarlı bu hastalığın görülme sıklığı dünya çapında artmaktadır. Bu nedenle, glikoz algılama, izleme ve insülin dağıtımında pratik uygulamalar için glikoza duyarlı malzemelerin geliştirilmesine acil ihtiyaç vardır [71]. Diyabet durumunda (hem tip I hem de tip II), kan glikoz seviyelerinin izlenmesi çok önemlidir. Dünyanın dört bir yanındaki araştırmacılar, kandaki glikoz seviyelerini algılayan glikoza duyarlı malzemelerin geliştirilmesi üzerinde sürekli çalışmaktadır. Örneğin, glikoz dehidrojenaz flavin adenin dinükleotid ile önceden muamele edilmiş grafen polilaktik asit filamentlerini basarak glikozun tespitini incelendi [72]. Sensör 0-400 mg/dL aralığındaki glikoz konsantrasyonlarını tespit edildi. Bir başka çalışmada, glikozu kademeli olarak tespit eden bir glikoz sensörü üretmiştir [73]. Bu çalışmada, glikoz oksidaza bağlı platin nanopartiküller, hazırlanan iki karbon nanotüp bazlı elektrot arasında biriktirilmiştir. Daha sonra nanopartiküllerin biriktirildiği alana bir polianilin nanotel ağı basılarak iki elektrot arasında direnç oluşturuldu. Sensör glikozu algıladığında, glikoz oksidaz hidrojenperoksit üretmek için glikozu parçalar. Hidrojen peroksit platin nanopartiküller tarafından katalize edilerek asidik bir ortam yaratılmıştır. Daha sonra pH'a duyarlı polianilin nanoteller devreyi tamamlamış ve kantitatif glikoz ölçümleri kaydedilmiştir. Glikoz algılamaya ek olarak, araştırmacılar insülin uygulaması için glikoza duyarlı cihazlar geliştirmeye çalışmaktadır. Şu anda iki strateji kullanılmaktadır:

- (i) glikozun glikopolimer-pektin komplekslerine rekabetçi bir şekilde bağlanmasıyla insülin salınımı (doğrudan tetikleme yöntemi);ve
- (ii) glikoz oksidaz enziminin reaksiyonuyla lokal asitleşmeye yol açan malzemenin şişmesiyle insülin salınımı.

Bu yaklaşımlardan farklı olarak, kök hücre türevli β -hücre yüklü polilaktik asit greftleri basarak insülin salınımı için yeni bir yöntem geliştirmiştir [74]. Bu hücre yüklü greftler, glikoz varlığında β -hücreleri tarafından sentezlenen insülini serbest bırakmaktadır. Glikoza duyarlı malzemelerin sentezlenmesindeki en büyük engel, ürün geliştirme sürecinde enzimlerin kullanılması ve depolanmasıdır. Bu nedenle, ürün geliştirmedeki her sentez adımının koşulları, enzimin biyolojik aktivitesinin korunmasını sağlamalıdır [75].

Sonuç

İnovasyon durağan değildir: 4D biyo-baskıdaki ilerlemeler henüz yeni başlamaktadır, ancak biyomedikal uygulamaların insanlık ve endüstri için önemli etkileri vardır. 3D biyo-baskı malzemelerine zaman boyutu getiren 4D biyo-baskı, doku rejenerasyonu için in vivo doku yapılarında dinamik yapısal değişikliklere neden olma yeteneği sunar. 4D biyo-baskı için olası bir yol, dış uyaranların uygulanması üzerine şekli ve yapısı katlanan ilginç 3D desenli biyolojik yapılar tasarlamak için uyarana duyarlı malzemeler ve şekil hafızalı polimerler kullanmaktır. 4D Biyo-baskının sınırlamalarından biri, uyaranların varlığında hücrelerin canlılığı ve bütünlüğüdür. Canlı hücrelerin önemli ölçüde tehlikeye atılmamasını sağlamak için uyaran modülasyonu gereklidir; 4D biyo-baskı yöntemine bağlı olarak, ısı, titreşim enerjisi ve kesme kuvvetleri, iskele taşınırken hücreleri etkileyebilir. Diğer engeller arasında pasif ve güvenilmez çalışma, ara deformasyon durumlarının düzenlenmemesi ve sınırlı malzeme bulunabilirliği yer almaktadır ve iskele bozunma ürünlerinin hücreler üzerindeki etkilerini değerlendirmek için daha fazla çabaya ihtiyaç vardır. Gelecekteki araştırmalar, örneğin ısıya duyarlı SMP'lerin termal uygulama sürecini yeniden düzenleyerek veya hidrojel nem emilimini yönetmek için metodolojileri optimize ederek, uyarıcıların uygulanması için daha etkili tekniklerin belirlenmesinin yolunu açabilir. İskelelerin immünojenikliğide ele alınması gereken bir diğer önemli konudur. Sonuç olarak, 4D baskı teknolojisi doku mühendisliği, insan ölçeğinde biyomalzemelerin kendi kendine montajı ve organ baskısı dâhil olmak üzere sağlık alanındaki araştırmalarda devrim yaratmaktadır.

REFERANSLAR

1. Li X, Tian H, Ding Y, Shao J, Wei Y. Electrically templated dewetting of a UV-curable prepolymer film for the fabrication of a concave microlens array with well-defined curvature. *ACS Appl Mater Interfaces*. 2013;5:9975–82. <https://doi.org/10.1021/am402043u>.
2. Yang Q, Gao B, Feng Xu. Recent advances in 4D bioprinting. *Biotechnol J*. 2020;15:1–10. <https://doi.org/10.1002/biot.201900086>.
3. Li Y-c, Zhang YS, Akpek A, Shin SR, Khademhosseini A. 4D bioprinting: the next-generation technology for biofabrication enabled by stimuli-responsive materials. *Biofabrication*. 2017;9:1–16. <https://doi.org/10.1088/1758-5090/9/1/012001> (IOP Publishing).
4. Morouço P, Lattanzi W, Alves N. Four-dimensional bioprinting as a new era for tissue engineering and regenerative medicine. *Front Bioeng Biotechnol*. 2017;5:1–3. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2017.00061>.
5. Tibbitts S. 4D printing: multi-material shape change. *Archit Des*. 2014;84:116–21.
6. Miao S, Zhu W, Castro NJ, Leng J, Zhang LG. Four-dimensional printing hierarchy scaffolds with highly biocompatible smart polymers for tissue engineering applications. *Tissue Eng - Part C*. 2016;22:952–63. <https://doi.org/10.1089/ten.tec.2015.0542>.
7. Kokkinis D, Schafner M, Studart AR. Multimaterial magnetically assisted 3D printing of composite materials. *Nat Commun*. 2015; 6. <https://doi.org/10.1038/ncomms9643>.
8. Gao B, Yang Q, Zhao X, Jin G, Ma Y, Xu F. 4D bioprinting for biomedical applications. *Trends Biotechnol*. 2016;34:746–56. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2016.03.004>.
9. Murphy SV, Atala A. review 3D bioprinting of tissues and organs. *Nat Publ Group*. 2014;32:773–85. <https://doi.org/10.1038/nbt.2958>.
10. Ursan I, Chiu L, Pierce A. Three-dimensional drug printing: a structured review. *J Am Pharm Assoc*. 2013;53:136–44. <https://doi.org/10.1331/JAPhA.2013.12217>.
11. Khoo ZX, Ee J, Teoh M, Liu Y, Chua CK. 3D printing of smart materials: a review on recent progresses in 4D printing. *Virtual Phys Prototyping*. 2015; 10. <https://doi.org/10.1080/17452759.2015.1097054>.
12. Zhang, W., Melcher, R., Travitzky, N., Bordia, R. K., Greil, P., 2009. Three-Dimensional Printing of Complex-Shaped Alumina/Glass Composites. *Advanced Engineering Materials*, 11(12), 1039-1043.

13. Hendrikson WJ, Rouwkema J, Clementi F, Van Blitterswijk CA, Farè S, Moroni L. Towards 4D printed scaffolds for tissue engineering: exploiting 3D shape memory polymers to deliver time-controlled stimulus on cultured cells. *Biofabrication*. 2017; 9. <https://doi.org/10.1088/1758-5090/aa8114>.
14. Miao S, Cui H, Nowicki M, Lee SJ, Almeida J, Zhou X, Zhu W, et al. Photolithographic-stereolithographic-tandem fabrication of 4D smart scaffolds for improved stem cell cardiomyogenic differentiation. *Biofabrication*. 2018; 10. <https://doi.org/10.1088/1758-5090/aabe0b>.
15. Zhang M, Vora A, Han W, Wocki RJ, Maune H, Le ABA, Thompson LE, et al. Dual-responsive hydrogels for direct-write 3D printing. *Macromolecules*. 2015;48:6482–8. <https://doi.org/10.1021/acs.macromol.5b01550>.
16. Tamay DG, Usal TD, Alagoz AS, Yucel D. 3D and 4D printing of polymers for tissue engineering applications. *Front Bioeng Biotechnol*. 2019;7:1–22. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2019.00164>.
17. Hu YY, Huang WM. Elastic and elastic-plastic analysis of multilayer thin films: closed-form solutions. *J Appl Phys*. 2004;96:4154–60. <https://doi.org/10.1063/1.1786339>.
18. Zarek M, Layani M, Cooperstein I, Sachyani E, Cohn D, Magdassi S. 3D printing of shape memory polymers for flexible electronic devices. *Adv Mater*. 2016;28:4449–54. <https://doi.org/10.1002/adma.201503132>.
19. Li YJ, Zhang FH, Liu YJ, Leng JS. 4D printed shape memory polymers and their structures for biomedical applications. *Sci China Technol Sci*. 2020;63:545–60. <https://doi.org/10.1007/s11431-019-1494-0>.
20. Zhao W, Liu L, Zhang F, Leng J, Liu Y. Shape memory polymers and their composites in biomedical applications. *Mater Sci Eng C*. 2019;97:864–83. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2018.12.054>.
21. Gladman S, Elisabetta A, Matsumoto A, Nuzzo RG, Mahadevan L, Lewis JA. Biomimetic 4D printing. *Nat Mater*. 2016;15:413–8. <https://doi.org/10.1038/nmat4544>.
22. Okwuosa TC, Pereira BC, Arafat B, Cieszyńska M, Isreb A, Alhnan MA. Fabricating a shell-core delayed release tablet using dual FDM 3D printing for patient-centred therapy. *Pharm Res*. 2017;34:427–37. <https://doi.org/10.1007/s11095-016-2073-3>.
23. Yang X, Lu Z, Wu H, Li W, Zheng L, Zhao J. Collagen-alginate as bioink for three-dimensional (3D) cell printing based cartilage tissue engineering. *Mater Sci Eng C*. 2018;83:195–201. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2017.09.002>.

24. Stratestefen H, Köpf M, Kreimendahl F, Blaeser A, Jockenhoevel S, Fischer H. GelMA-collagen blends enable drop-on-demand 3D printability and promote angiogenesis. *Biofabrication*. 2017; 9. <https://doi.org/10.1088/1758-5090/aa857c>.
25. Wei H, Zhang Q, Yao Y, Liu L, Liu Y, Leng J. Direct-write fabrication of 4D active shape-changing structures based on a shape memory polymer and its nanocomposite. *ACS Appl Mater Interfaces*. 2017;9:876–83. <https://doi.org/10.1021/acsami.6b12824>.
26. Shinoda H, Azukizawa S, Maeda K, Tsumori F. Bio-mimic motion of 3D-printed gel structures dispersed with magnetic particles. *J Electrochem Soc*. 2019;166:B3235–9. <https://doi.org/10.1149/2.0361909jes>.
27. Wu J, Yuan C, Ding Z, Isakov M, Mao Y, Wang T, Dunn ML, Jerry Qi H. Multi-shape active composites by 3D printing of digital shape memory polymers. *Sci Rep*. 2016;6:1–11. <https://doi.org/10.1038/srep24224>.
28. Ren L, Li B, Song Z, Liu Q, Ren Lei, Zhou X. Bioinspired fiber-regulated composite with tunable permanent shape and shape memory properties via 3d magnetic printing. *Composites Part B: Eng*. 2019;164:458–66. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.01.061>.
29. Hua D, Zhang X, Ji Z, Yan C, Bo Yu, Li Y, Wang X, Zhou F. 3D printing of shape changing composites for constructing flexible paper-based photothermal bilayer actuators. *J Mater Chem C*. 2018;6:2123–31. <https://doi.org/10.1039/c7tc05710e>.
30. Yang H, Leow WR, Wang T, Wang J, Jiancan Yu, He Ke, Qi D, Wan C, Chen X. 3D printed photoresponsive devices based on shape memory composites. *Adv Mater*. 2017;29:1–7. <https://doi.org/10.1002/adma.201701627>.
31. Zhang B, Zhang W, Zhang Z, Zhang YF, Hingorani H, Liu Z, Liu J, Ge Qi. Self-healing four-dimensional printing with an Ultraviolet curable double-network shape memory polymer system. *ACS Appl Mater Interfaces*. 2019;11:10328–36. <https://doi.org/10.1021/acsami.9b00359>.
32. Bajpai A, Baigent A, Raghav S, Brádaigh C, Koutsos V, Radacs N. 4D printing: materials, technologies, and future applications in the biomedical field. *Sustainability*. 2020;12:1–32. <https://doi.org/10.3390/su122410628>.
33. Joshi S, Rawat K, Karunakaran C, Rajamohan V, Mathew AT, Koziol K, Thakur VK, Balan ASS. 4D printing of materials for the future: opportunities and challenges. *Appl Mater Today*. 2020;18:100490. <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2019.100490>.

34. Pyo Y, Kang M, Jang Jy, Park Y, Son YH, Choi MC, Ha Jw, Chang YW, Lee CS. Design of a shape memory composite(SMC) using 4D printing technology. *Sensors Actuators A: Phys.* 2018;283:187–95. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2018.08.049>.
35. Zhao W, Zhang F, Leng J, Liu Y. Personalized 4D printing of bioinspired tracheal scaffold concept based on magnetic stimulated shape memory composites. *Compos Sci Technol.* 2019;184:107866. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2019.107866>.
36. Hsiao SH, Hsu SH. Synthesis and characterization of dual stimuli-sensitive biodegradable polyurethane soft hydrogels for 3D cell-Laden bioprinting. *ACS Appl Mater Interfaces.* 2018;10:29273–87. <https://doi.org/10.1021/acsami.8b08362>.
37. Chen S, Jinlian Hu, Zhuo H, Zhu Y. Two-way shape memory effect in polymer laminates. *Mater Lett.* 2008;62:4088–90. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2008.05.073>.
38. Basit A, L'Hostis G, Pac MJ, Durand B. Thermally activated composite with two-way and multi-shape memory effects. *Materials.* 2013;6:4031–45. <https://doi.org/10.3390/ma6094031>.
39. Hoogenboom R. Temperature-responsive polymers: properties, synthesis and applications. *Smart Polymers and their Applications.* Woodhead Publishing Limited; 2014. <https://doi.org/10.1533/9780857097026.1.15>.
40. Senatov FS, Niaza KV, Yu Zadorozhnyy M, Maksimkin AV, Kaloshkin SD, Estrin YZ. Mechanical properties and shape memory effect of 3D-printed PLA-based porous scaffolds. *J Mech Behav Biomed Mater.* 2016;57:139–48. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2015.11.036>.
41. Dutta S, Cohn D. Temperature and pH responsive 3D printed scaffolds. *J Mater Chem B.* 2018; 6. <https://doi.org/10.1039/x0xx00000x>.
42. Zarek M, Mansour N, Shapira S, Cohn D. 4D printing of shape memory-based personalized endoluminal medical devices. *Macromol Rapid Commun.* 2017;38:1–6. <https://doi.org/10.1002/marc.201600628>.
43. Cui J, Del Campo A. Photo-responsive polymers: properties, synthesis and applications. *Smart Polymers and their Applications.* Woodhead Publishing Limited; 2014. <https://doi.org/10.1533/9780857097026.1.93>.
44. Zhao Z, Jiangtao Wu, Xiaoming Mu, Haosen Chen H, Qi J, Fang D. Origami by frontal photopolymerization. *Sci Adv.* 2017;3:1– 8. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1602326>.

45. Boyle BM, French TA, Pearson RM, McCarthy BG, Miyake GM. Structural Color for additive manufacturing: 3D-printed photonic crystals from block copolymers. *ACS Nano*. 2017;11:3052–8. <https://doi.org/10.1021/acsnano.7b00032>.
46. Ionov L. Hydrogel-based actuators: possibilities and limitations. *Mater Today*. 2014;17:494–503. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2014.07.002>.
47. Mulakkal MC, Trask RS, Ting VP, Seddon AM. Responsive cellulose-hydrogel composite ink for 4D printing. *Mater Des*. 2018;160:108–18. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.09.009>.
48. Lv C, Xia H, Shi Q, Wang G, Wang YS, Chen QD, Zhang YL, Liu LQ, Sun HB. Sensitively humidity-driven actuator based on photopolymerizable PEG-DA films. *Adv Mater Interfaces*. 2017; 4. <https://doi.org/10.1002/admi.201601002>.
49. Lei D, Yang Y, Liu Z, Chen S, Song B, Shen A, Yang B, et al. A general strategy of 3D printing thermosets for diverse applications. *Mater Horizons*. 2019;6:394–404. <https://doi.org/10.1039/c8mh00937f>.
50. Lin G, Makarov D, Schmidt OG. Magnetic sensing platform technologies for biomedical applications. *Lab on a Chip*. Royal Society of Chemistry; 2017. <https://doi.org/10.1039/C7LC00026J>.
51. Zhu P, Yang W, Wang R, Gao S, Li Bo, Li Qi. Applications of polymer, composite, and coating materials 4D printing of complex structures with a fast response time to magnetic stimulus school of materials science and engineering. *Appl Materials Interface*. 2018;10:36435–42. <https://doi.org/10.1021/acscami.8b12853>.
52. Boncheva M, Andreev SA, Mahadevan L, Winkleman A, Reichman DR, Prentiss MG, Whitesides S, Whitesides GM. Magnetic self-assembly of three-dimensional surfaces from planar sheets. *PNAS*. 2005;102:3924–9.
53. Markides H, Rotherham M, El Haj AJ. Biocompatibility and toxicity of magnetic nanoparticles in regenerative medicine. *J Nano mater*. 2012;2012:1–11. <https://doi.org/10.1155/2012/614094>.
54. Pretsch T. Review on the functional determinants and durability of shape memory polymers. *Polymer*. 2010;2:120–58. <https://doi.org/10.3390/polym2030120>.
55. Sun S, Wise J, Cho M. Human fibroblast migration in three dimensional collagen. *Tissue Eng*. 2004;10:1548–58.
56. Dong S-L, Han Lu, Cai-xia Du, Wang X-y, Li L-H, Wei Y. 3D printing of aniline tetramer-grafted-polyethylenimine and pluronic F127 composites for electroactive scaffolds. *Macromol Rapid Commun*. 2017;201600551:1–7. <https://doi.org/10.1002/marc.201600551>.

57. Cvetkovic C, Raman R, Chan V, Williams BJ, Tolish M, Bajaj P. Three-dimensionally printed biological machines powered by skeletal muscle. *PNAS*. 2014;111:10125–30. <https://doi.org/10.1073/pnas.1401577111>.
58. Bagherifam S, Skjeldal FM, Griffiths G, Mælandsmo GM, Enge bråten O, Nyström Bo, Hasirci V, Hasirci N. PH-responsive nano carriers for doxorubicin delivery. *Pharm Res*. 2015;32:1249–63. <https://doi.org/10.1007/s11095-014-1530-0>.
59. Ashfaq UA, Riaz M, Yasmeen E, Yousaf M. Recent advances in nanoparticle-based targeted drug-delivery systems against cancer and role of tumor microenvironment. *Crit Rev Ther Drug Carrier Syst*. 2017;34:317–53. <https://doi.org/10.1615/CritRevTherDrugCarrierSyst.2017017845>.
60. Arizaga A, Ibarz G, Piñol R. Stimuli-responsive poly(4-vinyl pyridine) hydrogel nanoparticles: synthesis by nanoprecipitation and swelling behavior. *J Colloid Interface Sci*. 2010;348:668–72. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2010.05.051>.
61. Reyes-Ortega F. pH-responsive polymers: properties, synthesis and applications. *Smart Polymers and their Applications*. Wood head Publishing Limited; 2014. <https://doi.org/10.1533/9780857097026.1.45>.
62. Lowman AM, Morishita M, Kajita M, Nagai T, Peppas NA. Oral delivery of insulin using pH-responsive complexation gels. *J Pharm Sci*. 1999;88:933–7. <https://doi.org/10.1021/js980337n>.
63. Makhlof A, Tozuka Y, Takeuchi H. Design and evaluation of novel pH-sensitive chitosan nanoparticles for oral insulin delivery. *Eur J Pharm Sci*. 2011;42:445–51. <https://doi.org/10.1016/j.ejps.2010.12.007>.
64. Huang L, Jiang R, Jingjun Wu, Song J, Bai H, Li B, Zhao Q, Xie T. Ultrafast digital printing toward 4D shape changing materials. *Adv Mater*. 2017;29:1–6. <https://doi.org/10.1002/adma.201605390>.
65. Kang Y, Walish JJ, Gorishnyy T, Thomas EL. Broad-wave length-range chemically tunable block-copolymer photonic gels. *Nat Mater*. 2007;6:957–60. <https://doi.org/10.1038/nmat2032>.
66. Brownlee M, Cerami A. A glucose-controlled insulin-delivery system: semisynthetic insulin bound to lectin. *Science*. 2016;206:1190–1.
67. Tauro JR, Gemeinhart RA. Matrix metalloprotease triggered delivery of cancer chemotherapeutics from hydrogel matrixes. *Bioconjug Chem*. 2005;16:1133–9. <https://doi.org/10.1021/bc0501303>.

68. Wang X, Qin XH, Chengzhi Hu, Terzopoulou A, Chen XZ, Huang TY, Maniura-Weber K, Pané S, Nelson BJ. 3D printed enzymatically biodegradable soft helical microswimmers. *Adv Func Mater.* 2018;28:1–8. <https://doi.org/10.1002/adfm.201804107>.
69. Song KH, Highley CB, Rouff A, Burdick JA. Complex 3D-printed microchannels within cell-degradable hydrogels. *Adv Func Mater.* 2018;28:1–10. <https://doi.org/10.1002/adfm.201801331>.
70. Zelzer M, Todd SJ, Hirst AR, McDonald TO, Ulijn RV. Enzyme responsive materials: design strategies and future developments. *Biomater Sci.* 2013;1:11–39. <https://doi.org/10.1039/c2bm00041e>.
71. Yeh H-C, Brown TT, Maruthur N. Comparative effectiveness and safety of methods of insulin delivery and glucose monitoring for diabetes mellitus. *Ann Intern Med.* 2013;157:336–47.
72. Adams A, Malkoc A, La Belle JT. The development of a glucose dehydrogenase 3D-printed glucose sensor: a proof-of-concept study. *J Diabetes Sci Technol.* 2018;12:176–82. <https://doi.org/10.1177/1932296817715272>.
73. Song E, da Costa TH, Choi JW. A chemiresistive glucose sensor fabricated by inkjet printing. *Microsyst Technol.* 2017;23:3505–11. <https://doi.org/10.1007/s00542-016-3160-4>.
74. Matsumoto A, Ishii T, Nishida J, Matsumoto H, Kataoka K, Miyahara Y. A synthetic approach toward a self-regulated insulin delivery system. *Angew Chem.* 2012;124:2166–70. <https://doi.org/10.1002/ange.201106252>.
75. Song J, Millman JR. Economic 3D-printing approach for trans plantation of human stem cell-derived β -like cells. *Biofabrication.* 2017;9:1–14. <https://doi.org/10.1088/1758-5090/9/1/015002>.

13. Bölüm

3D Baskı için Akıllı Biyomateryaller

Zülfü TÜYLEK¹

¹ Öğr. Grv., Malatya Turgut Özal Üniversitesi, Yeşilyurt MYO, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, Malatya/Türkiye, Orcid: 0000-0002-9086-1327, zulfu.tuylek@ozal.edu.tr

Giriş

Mikro ve nano ölçekli 3D baskı, doku rejenerasyonu, kişiselleştirilmiş tıp ve akıllı biyotıp alanlarında biyomimetik mimariler üretmek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Yeni akıllı biyomimetik malzemeler, basılı yapıların çok yönlülüğünü ve işlevselliğini önemli ölçüde artırmıştır. Doku rejenerasyonu, kişiselleştirilmiş tıp ve yapay organlardaki ilerlemeleri kolaylaştıran kapsamlı biyomalzemelerden oluşan karmaşık küçük yapıların üretimi için büyük birtalep vardır (Zhu & ark., 2021). Son yıllarda, üç boyutlu (3D) baskı, doku mühendisliği iskelelerinin ve biyoyapıların üretiminde olgun bir teknoloji haline gelmiştir (Zhang & ark., 2022). Bununla birlikte, 3D baskı, 3D modelleme yetenekleri, bireysel özelleştirme, geniş malzeme seçimi ve uygun maliyetli ekipman dahil olmak üzere biyomalzemelerin imalatında çeşitli avantajlar sunmaktadır (Bao, Paunovic & Leroux, 2022). Işık kaynaklı katılma ve termal eriyik biriktirme gibi modelleme ilkelerine dayanan 3D baskı, reçineler, tozlar ve lifler kullanılarak biyolojik yapıların üretilmesi için araştırılmıştır (Guo & ark., 2022). Malzeme bilimi ve gelişmiş üretim tekniklerindeki son gelişmelerle birlikte, mikro ve nano ölçekte küçük yapılar üretmek için 3D baskı geliştirilmiştir (Bobrin & ark., 2022). Biyomalzemeler kullanılarak 3D mimarinin hassas kontrolü, basılı yapılardaki hücrelerin davranışlarını kontrol edebilir ve biyolojik işlevlerini geliştirebilir (Carthew & ark., 2022).

3D baskıda kullanılan biyomalzemeler ve biyomürekkepler, basılı yapıların basılabilirliğinde ve işlevselliğinde önemli bir rol oynamaktadır. Çevredeki biyolojik ortamla yakın etkileşime girebilen yeni biyomalzemelerin geliştirilmesi, doku mühendisliği iskelelerinin ve biyolojik yapıların imalatında büyük talep görmektedir. Yeni akıllı biyomalzemeler, biyomedik alanda 3D veya 4D baskının çok yönlülüğünü ve işlevselliğini artırmaktadır (Amukarimi & ark., 2022). Yapay zekâ alanındaki son gelişmeler, akıllı biyomalzemelerin çok işlevliliğine yeni bir soluk getiren gelişmiş malzemelerin geliştirilmesini hızlandırmıştır. Zekânın iki temel özelliği öğrenme ve adaptasyon olduğundan, akıllı biyomalzemeler çevrelerindeki mikro ortamla etkileşime girebilir, özelliklerini kendi kendilerine düzenleyebilir ve hatta ilgili hücresel faaliyetleri düzenleyebilir (Amukarimi & ark., 2021). Akıllı biyomalzemelerin en son mikro ve nano ölçekli 3D baskı teknolojileriyle entegrasyonu, basılı yapıların yapısal şeklini, fiziksel veya kimyasal özelliklerini ve malzeme bileşimini uyarlamak için yeni bilgiler üretir, böylece gelişmiş hücre davranışı ile doğal mikro ortamı taklit eder.

Malzeme bilimindeki hızlı gelişmelerle birlikte, mikro ve nano ölçekli 3D baskı ile ilişkili akıllı biyomalzemeler, kendi kendine teşhis ve kendi kendini iyileştirme gibi biyolojik işlevleri kolaylaştırmaktadır. Bu çalışma, özellikle

mikro ve nano ölçekli 3D baskı için akıllı biyomalzemelerdeki son gelişmelerin sistematik ve kapsamlı bir incelemesini sunmaktadır. Biyomedikal alandaki tipik mikro ve nano ölçekli 3D baskı teknolojileri, çalışma prensipleri ve baskı çözünürlüğü açısından önemlidir. Uygulamalarda akıllı biyomalzemeler ve 3D baskı teknolojilerini birleştiren son yenilikler çok dikkat çekmiştir. Biyopolimerler, hidrojel ve metal / seramik biyomalzemeler dâhil olmak üzere tipik akıllı biyomalzemelerin malzeme özellikleri, işleme kabiliyetleri ve biyomedikal uygulamaları ana hatlarıyla belirtilmekte; 3D baskı için akıllı biyomalzemeler için mevcut zorluklar ve gelecekteki fırsatlar tanımlanmaktadır (Chen & ark., 2020).

1. 3D Biyo-baskının Tarihçesi

Katmanlı üretim (AM), bilgisayar kontrollü tasarım ve üretim tekniklerine dayalı olarak 3D nesnelerin oluşturulmasını sağlayan 'malzemeleri katman katman birleştirme süreci' olarak tanımlanır. AM yaklaşımı, karmaşık şekiller için çok çeşitli malzemelerin kullanılmasına izin verir. Araştırmalarda seçici lazer sintereleme, stereolitografik eklemeli üretim ve kaynaşmış biriktirme modellemesi (FDM) dâhil olmak üzere AM tekniklerinin çeşitli uygulamaları bulunabilir (Skardal & ark., 2012). Biyomedikal alanda, FDM esas olarak ekstrüzyon, inkjet ve lazer destekli biyo-baskı şeklinde görülür, halk arasında 3D biyo-baskı olarak bilinir. Bir FDM türü olan biyo-baskı, canlı hücreleri ve biyomalzemeleri eş zamanlı olarak üretmek için bilgisayar destekli tasarım kullanır. Materyal, bilgisayar destekli tasarım kullanılarak katman katman oluşturulur. İskele tabanlı ya da iskelesiz biyo-baskı, bir birinin rakibi ya da tamamlayıcısıdır. Tıbbi uygulamalar için karmaşık yapıların ve malzemelerin hızlı ve kolay üretimi için özelleştirilmiş genetik çözümler sağlar. Dejenerasyon, travma, neoplazi ve konjenital hastalıklardan kaynaklanan doğal insan dokusundaki kusurlar nedeniyle doku nakline olan küresel ihtiyaç artmaya devam edebilir. Bu endüstrinin gelişimi, nakil için mevcut organların sınırlı sayıda olmasıyla motive edilse de, kayıp veya kusurlu dokuların rehabilitasyonuna yönelik talep, AM canlı hücreler, nükleik asitler, ilaç partikülleri, proteinler ve büyüme faktörlerini içeren erken araştırmalara öncülük etmiş ve etmeye devam etmektedir. Belirli biyolojik nesnelerin geliştirilmesi için güçlü bir araçtır (İbrahim, 2018). 40 yılı aşkın bir süredir biyo-baskı teknolojisi, katman katman birleştirme teknikleri kullanılarak biyomedikal alanda anatomik modeller ve uygulamalar üretmek için geliştirilmiştir. 1983 yılında stereolitografi biyo-baskı endüstrisini icat etmiş ve öncülük etmiştir; 1986'da FDM ile ilk bilinçli hücreler Hull tarafından gösterilmiş ve patenti alınmıştır (Hull, 2015). 1988'de biyo-baskı ilk kez mürekkep püskürtmeli biyo-yazıcılar kullanılarak gösterilmiştir. Kolajen ve fibronektin

üretmek için termal mürekkep püskürtmeli yazıcılar kullanılmış ve hücreleri biriktirmek için kriyoscripting teknikleri kullanılmıştır. 1990'ların başında, Sachs ve arkadaşları geleneksel bir mürekkep püskürtmeli kafa kullanarak yeni bir toz bazlı üretim şekli geliştirmiştir. Tozu bağlamak için bağlayıcıların kullanımı, özellikle metaller ve seramikler için daha da geliştirilmiştir. Mironov ve arkadaşları, dokunun yüzey geriliminin, hücreler arasındaki moleküler yapışmanın makroskopik tezahürünün bir ürünü olduğu ve dokunun kohezif kuvvetinin nicel bir ölçüsünü sağladığı sonucuna varmıştır. Dolayısıyla bu haliyle teknik, biyolojik dokular üzerinde kullanım için uygun değildir (Huang & ark., 2017). Daha sonra, 1997 yılında Griffith ve arkadaşları, birincil hepatositlere ve endotel hücrelerine implante edilen poli(laktik asit-glikolik asit) ve poli(L-laktid) iskeleleri üretmek için inkjet biyo-baskı yöntemini kullanmıştır. Yine 1999 yılında, karmaşık anatomiye sahip canlı hücrelerin biriktirilmesi için lazer destekli biyo-baskıda ilk atılım Odde ve arkadaşları tarafından tamamlanmıştır (Kerour Edan & ark., 2018). Organ büyütme potansiyeli 2000 yılında uzamsal iskelelerin tasarımıyla başladı ve 2001 yılında ilk organların oluşturulmasına yol açtı. Aynı yıl, bir metin deseni oluşturmak içinde natüre deoksiribonükleik asidi (DNA) bir mürekkep püskürtmeli yazıcı kartuşuna yükledi ve ardından hibridize bir DNA deseni yazdırdı (Goldman & Barabino, 2017). Agaroz bazlı mikroakışkan hidrojellerin kültürü, büyük, tam kalınlıkta doku mühendisliği yapılmış eklem kıkırdağı yapılarının gelişimini destekliyor. MacBeth ve arkadaşları tarafından dental implantlar üzerinde yapılan diğer çalışmalar, biyoaktif proteinlerin inkjet biyo-baskı kullanılarak sert ve yumuşak dokular üzerinde biriktirilebileceğini ve baskıdan sonra yapılarını koruyabileceğini göstermiştir. Bu deneyde, protein içeren tampon çözeltiler 150-200 mm çapındaki cam plakalara uygulanmıştır. Bu araştırma ve süreç, bazıları halen geliştirilmekte olan yeni ortopedik ve dental uygulamaların temelini oluşturmuştur, 2002 yılında, ilk ekstrüzyon tabanlı yazıcı Thomas Borland tarafından önerilmiştir. Sadece bir yıl sonra Forgacs ve arkadaşları, iskele olmadan 3D biyo-üretimi mümkün kılan ilk cihaz olarak biyo-yazıcıyı sundu. İlk ticari biyoyazıcı 2009 yılında üretildi ve birkaç ay sonra biyomühendislere iskeleye ihtiyaç duymadan biyolojik olarak parçalanabilen ilk damarları sağladı. Son olarak, 2012 yılında, doku baskısı ve biyo-baskılı dokunun mekanik değerlendirmelerinde devrim yaratan önemli bir adım olan in situ biyo-baskı ilk kez denendi. Front Mech Eng 2020'de 6 büyük cilt yaralarının hızlandırılmış iyileşmesi üzerine bir makale yayınladı. Ertesi yıl, eklem kıkırdağı ve dolaşım sistemiyle entegre dokunun tanıtılmasına yol açtı. 2015'ten bu yana osteojenik kompozit kemik biyomalzemelerinin geliştirilmesi, trofik faktörlü vasküler doku, malzemelerde anti-mikrobiyal özellikler, 4D biyo-baskı, eklem kıkırdağı,

kıkırdak modifikasyonu, pullu kalp modellerinin üretimi, ortopedi endüstrisindeki ilerlemeler, 'askıdaki hidrojenlerin serbest biçimli geri dönüşümlü gömülmesi' (FRESH) ve bazıları bu raporun bölümlerinde ayrıntılı olarak açıklanan diğer birçok yeni biyo-baskı ürünü (Gu & ark., 2020). Buna ek olarak, biyo-baskı endüstrisi sıklıkla tartışılmayan farmasötiklerle uğraşmaktadır. 2018'de piyasaya yeni çıkan ilaçları, özellikle de antibiyotikleri test etmek için bir program başlatıldı. Bu yeni farmasötik çözüm, mikroorganizma örnekleri içeren küçük test tüplerine baskı yapmak için geliştirilmiş bir yazıcı kullanıyor. Mürekkep püskürtmeli baskı, farklı konsantrasyonlar da çeşitli ilaçları test etme imkânı sundu (Li & ark., 2020).

2. Tıpta 3D biyo-baskı etiği

Biyo-baskı süreci, insan kullanımına uygun biyolojik bileşenler üretme nihai hedefine ulaşmak için bir dizi adım içermektedir. Bununla birlikte, canlı deneklerin özelleştirilebilir çözümlerde büyük ölçekli üretimini sağlamak için düzenleyici onay gereklidir ve bu alandaki etik uygulamaların gözden geçirilmesi gelecekteki gelişmeler için gereklidir. Biyo-baskıda bir dizi önemli etik husus vardır. Örneğin, neyin basılıp neyin basılmaması gerektiği, insan denekler üzerinde yapılan testlerin altında yatan riskler, klinik deneylerin yürütülmesi, geri döndürülemezlik ve kaybedilen terapötik fırsatlar, tekrarlanabilirlik ve belirli bir test çerçevesinin olmaması. Gelişmekte olan bu teknolojiye uygulanan etik model, ahlaki argümanların tipik türleri ve kalıpları üzerine tartışmayı düzenleyen Yeni ve Gelişmekte Olan Bilim ve Teknoloji Etiği'dir (NEST) (Chen & ark., 2021). NEST etiği iki düzeyde analiz edilmektedir. Birinci düzey dört alandan oluşmaktadır:

- kolektif fayda, faydacılık, sonuçsalcılık ve deontoloji ile ilgili meta-etik konular
- haklar deontolojisi
- temel insan ilkeleri ve hakları, adalet teorileri, maliyet ve faydaların dağılımı
- iyi yaşamın ne olduğu kavramı

Fayda ve riskleri yansıtan maliyet ve faydaların dağılımı, çaba, liyakat, gereklilik ve hakkaniyeti dikkate alır (Bakarich & ark., 2015). Yaygın olarak kabul gören kural maksimum kuraldır, buna göre, incelenen teknoloji ancak şu anda en dezavantajlı durumda olanlara yardımcı oluyorsa eşitliği artırmalıdır. Bu durumda, ekipmanın maliyeti ve operatörler için gerekli beceri düzeyi gözönüne alındığında, biyo-baskı işleminin maksimum kurala uyması pek olası değildir. 'İyi yaşam' fikrine karşı argüman, "bu teknoloji ile ne tür bir yaşam elde edilebilir?"

sorusu etrafında dönmektedir. Nakil listelerinde bekleme sürelerinin iki ila beş yılı aştığı düşünüldüğünde, teknolojinin işlevsel organlar üretebilmesi pek çok insan için büyük fayda sağlayacaktır. Talep üzerine kalp ve akciğer üretme becerisi pek çok insan için çok ihtiyaç duyulan bir çözüm sağlayacaktır. İkinci düzey, teknoloji ve ahlaki değişim arasındaki ilişkiyle ilgilidir. Bu seviye, teknolojik deterministler ile iradeciler, kötümserler ile iyimserler arasındaki tartışmaları ve teknolojinin neden olduğu değişimleri analiz etmektedir. Bu alan Vijayaven kataraman ve arkadaşları tarafından detaylı bir şekilde kavramsallaştırılmış olup, tekno-ahlaki değişime ilişkin ikinci düzeyin birinci düzeye kıyasla önemli ölçüde daha az ilgi gördüğünü tespit etmişlerdir. Bu nedenle grup, tartışmayı daha iyi ölçmek ve bilgiyi daha erişilebilir ve anlaşılabilir kılmak için 'sert etki' ve 'yumuşak etki' terimlerini kullanmıştır. Sert etki, yeni teknolojilerin geçim kaynakları ve refah üzerindeki etkisini ifade eder. Yumuşak etki ise deneyimler, alışkanlıklar ve algılar gibi ölçülmesi kolay olmayan konularla ilgilidir (Vijayaven kataraman, Lu & Fuh., 2016).

2.1. Mikro yapılar

Bir malzemenin özellikleri nano ve mikro yapısıyla yakından ilişkilidir. Polimer çözeltileri ve güçlü elektrik alanları, çok çeşitli uygulamalar için nano ila mikro boyutlu sürekli ve süreksizlikleri döndürmek için kullanılır (Zhang & ark., 2017). Bu nedenle malzemelerin mikro yapısını anlamak, uygulamanın gereksinimlerini karşılayan mükemmel özelliklere sahip malzemeler tasarlamak için çok önemlidir. Bu, nano/mikro/makro liflerin uygun, çok yönlü ve ölçeklenebilir sentezi için en çok çalışılan tekniklerden biridir. Süreç, işlenmemiş ve kompozit formlarda bir dizi muazzam elyaf tasarımı hazırlamak için doğal ve sentetik kökenli çeşitli polimerler kullanır. Malzeme karakterizasyon tekniklerinin gelişmesiyle birlikte, elektron mikroskobu, taramalı prob mikroskobu, X-ışını kırınımı ve atomik prob tomografisi gibi yöntemler kullanılarak mikrometre ölçeğinden atomik ölçeğe kadar mikro yapıları doğrudan görselleştirmek mümkün hale gelmiştir. Son teknoloji karakterizasyon tekniklerinin geliştirilmesi, malzemelerin yapısı ve özellikleri arasındaki ilişkiyi anlamamızı büyük ölçüde ilerletmiştir.

2.2. Nano yapılar

Nanoteknoloji, enerji, temiz su, sağlık, tıp ve iklim gibi bir dizi küresel soruna çözüm aramak için nanomalzemeleri kullanan modern bir bilimsel yaklaşımdır. Malzemelerin özellikleri nano yapılarıyla yakından ilişkilidir. Bu nedenle malzemelerin nano yapısını anlamak, uygulama gereksinimlerini karşılayan üstün özelliklere sahip malzemeler tasarlamak için çok önemlidir (Xue & ark.,

2017). Malzeme karakterizasyon tekniklerinin geliştirilmesi, elektron mikroskobu, taramalı prob mikroskobu, X-ışını kırınımı ve atomik prob tomografisi gibi teknikler kullanılarak mikrometre ölçeğinden atomik ölçeğe kadar mikro yapıların doğrudan görselleştirilmesini mümkün kılmıştır. Son teknoloji karakterizasyon tekniklerinin geliştirilmesi, malzemelerdeki yapı-özellik korelasyonlarını anlamamızı önemli ölçüde ilerletmiştir.

Nanomalzemeler, tek boyutlu (1B) fiberler, iki boyutlu (2B) fiber filmler, üç boyutlu (3B) fiber süngerler ve dört boyutlu (4B) fiber tabanlı basılı madde dâhil olmak üzere çeşitli formlarda biyouyumluluk, toksik olmama ve çevresel duyarlılık gibi faydalı fizikokimyasal özelliklere sahip olacak şekilde uyarlanabilir, kullanılabilir. Bunlar arasında tek boyutlu nanolifler kolaylıkla bulunabilmekte ve 2D, 3D ve 4D lif tabanlı seçenekler için temel yapı taşları olarak kullanılabilir (Yang & ark., 2018). Özellikle nanoliflerde akıllı davranışın evrimi, sadece geleneksel elektroçizme teknikleri hala tek başına kullanıldığı için beklenemez. İşlevselliği geliştirmek için, bazen diğer malzeme sentez teknikleriyle birlikte, yerinde ve yerinde olmayan elyaf modifikasyonu gereklidir. Bu bağlamda, eklemeli modelleme yoluyla akıllı sistemlerin üretilmesi, uyarım sonrası morfolojik değişiklikler ve işlev açısından doğal hücrelere ve dokulara tam olarak karşılık gelen basılı yapıların kullanılmasına olanak sağlamaktadır. Akıllı yapılar henüz akıllı biyosistemler olarak işlev görebilecek kadar mükemmelleştirilememiş olsa da, 4D biyo-baskı, mikro ortamdaki değişikliklere anında yanıt vermek için biyomateryaller arasında aktif koordinasyona izin verir (Beigmoradi, Samimi & Mohebbi-Kalhari, 2018). 4D biyo-baskı, akıllı bir sistem olarak kullanılabilir bir 3D biyo-baskı sistemi oluşturmak için kullanılabilir bir 3D biyo-baskı sisteminin oluşturulmasına izin veren bir teknoloji olan 3D biyo-baskıdan yeni bir gelişmedir, programlanabilir uyarılara yanıt veren ve hassas bir şekilde canlandırılan hidrojel de dâhil olmak üzere çok malzemeli biyoyapıların tasarımını içerir. Polimer kompozitler, elastomerler ve iskeleler, dördüncü bir boyut olarak zaman içinde konformasyonu, özellikleri ve işlevi tersinir veya tersinmez olarak değiştirebilir. Teknoloji aynı zamanda öngörülebilir ve yazıcıdan bağımsızdır, kendi kendine montaja, çok işlevliliğe ve kendi kendini onarmaya izin verir. 4D biyo-baskı, biyolojik hücre ve doku replikasyonu için gerekli morfoloji ve özellikleri tam olarak taklit eden titiz ve spesifik oryantasyona sahip nano-mikro yapılar oluşturmak için matematiksel modelleme kullanır. Kişiselleştirilmiş biyomateryal şekil ve boyutlarının üretilmesini sağlar. Bu ilerleme, sürekli ritmik kalp ve rastgele kasılan kas-iskelet sistemi ve kalp kası gibi, işlevleri boyunca akıllı onarım gerektiren dinamik insan dokularından ilham alıyor.

3. Biyomedikal sektörü için mikro ve nano ölçekli 3D baskı

3D baskı, mikro ve nano ölçekli topolojik özelliklerin ve çoklu malzeme bileşiminin esnek kontrolüne izin vererek biyofabrikasyon ve biyotıpta etkili bir yaklaşım olarak ortaya çıkmaktadır. Mekanik ekstrüzyon, lazer kaynaklı katılaştırma, elektriksel başlatma ve eriyik biriktirme gibi oluşum ilkelerine dayanan çok yönlü 3D baskı teknikleri, karmaşık geometrilere sahip biyomalzemeler tasarlamak ve üretmek için kullanılmıştır (Wang & ark., 2018). Genel olarak, biyomedikal sektöründe kullanılan 3D baskı teknolojileri iki kategoriye ayrılabilir: ekstrüzyon tabanlı baskı ve lazer kaynaklı katılaştırma. Bulamaç bazlı malzeme ekstrüzyonuna dayalı doğrudan mürekkep çizimi, geniş bir malzeme penceresi ve düşük maliyetle 3D biyo yapıların üretimi için mükemmel esneklik ve uygunluk sunar (Rahim & ark., 2019). Elektrohidrokinamik baskı, canlı hücrelerin ölçeğine benzer biyomimetik yapısal boyutlara sahip yapay dokuyu kontrol etmek ve üretmek için elektrikle indüklenen malzeme fırlatmayı kullanır (Liu & Zhai., 2022). Mikrostereolitografi ve seçici lazer sinterleme/eritme gibi lazer kaynaklı 3D baskı, nozülden kaynaklanan mekanik gerilimi önlemek ve biyomalzemelere verilen zararı azaltmak için ışığa duyarlı reçinelerin ve tozların fotopolimerizasyonunu kullanır (He & Zhai., 2020). Ortopedik implantların, yumuşak dokuların ve biyoelektroniklerin üretimi için çeşitli 3D baskı teknolojileri geliştirilmiştir. İyi bir basılabilirlik elde etmek için, farklı çalışma prensiplerine dayanan farklı 3D baskı teknolojilerireoloji, erime noktası, iletkenlik ve ışığa duyarlılık gibi farklı fiziksel özellikler gerektirir. Uygun bir 3D baskı işlemi seçerken, biyomateryalin özellikleri, yapısal gereksinimler ve özel uygulama kapsamlı bir şekilde dikkate alınmalıdır (Barui, 2021) (Dubbin & Zhai., 2021). Tipik 3D baskı teknolojileri Tablo 1'de özetlenmiştir.

Tablo 1. Biyomedikal alan için 3D baskı teknikleri.

3D baskı teknikleri	Çalışma prensipleri	Yazdırılabilir biyomalzemeler	Avantajları	Sınırlama
Doğrudan mürekkeple yazma	Viskoz malzemeler mikro nozüller aracılığıyla ekstrüde edilir ve katman katman biriktirilir.	Biyopolimer bulamaçlar, biyoseramik bulamaç, hidrojel biyomürekkepler, canlı hücreler.	Çok çeşitli biyomalzeme seçenekleri ve karışımları için uygundur. Düşük maliyetli ekipman, oda işleme sıcaklığı.	Kötü baskı çözünürlüğü, düşük baskı verimliliği.
Kaynaşmış biriktirme modellemesi	Biyopolimer eritilir ve nozülden ekstrüde edilir. Erimiş lifler lamine edilir ve 3D bir yapı oluşturmak için katlaştırılır.	Termoplastik biyopolimerler ve kompozitler.	Uygun maliyetli malzeme ve ekipman, mükemmel mekanik özellikler.	Canlı hücrelerle baskı desteklenmemektedir, sınırlı baskı çözünürlüğü.
Seçici lazer sinterleme / eritme	Tozların lazerle eritilmesi ve birleştirilmesi. Katmanlar tamamlandığında toz yatağı aşağı doğru hareket eder.	Metalik biyomalzemeler, biyoseramik tozlar.	Çevreleyen toz tekrar tekrar kullanılabilir, büyük iskele imalatı, mükemmel mekanik özellikler.	Pürüzlü yüzey kalitesi, pahalı toz ve lazer sistemleri, Hücre yazdırma kullanılamaz.
Elektrohidro dinamik baskı	Sıvı veya erimiş biyomalzemelerin elektrohidrodinamik olarak indüklenmiş püskürtülmesi. Hareketli aşama, basılı liflerin/damlacıkların yerleşimini kontrol eder.	Biyopolimer çözeltisi veya eriyiği, biyoaktif nanopartiküller veya canlı hücreler malzeme sistemine karıştırılabilir.	Yüksek baskı çözünürlüğü, uygun maliyetli malzeme ve ekipman.	Düşük baskı verimliliği. Büyük ölçekli biyoyapılar için sınırlamalar.

3D baskı teknikleri	Çalışma prensipleri	Yazdırılabilir biyomalzemeler	Avantajları	Sınırlama
Mikrostereolitografi	Işığa duyarlı reçine, dijital bir ayna sistemi ile katman katman katılaştırılır.	Biyopolimer reçineler ile harmanlanmıştır.	Nispeten yüksek çözünürlük ve yüksek baskı hızı.	Fotobaşlatıcılar biyolojik işlevi sınırlar.
Mürekkep püskürtmeli baskı	Piezoelektrik veya termal inkjet kafalar kullanılarak sıvı biyomalzemelerin yüksek frekanslı dağıtımı.	Biyopolimerik malzemeler, hidrojel biyomalzemeler, biyoseramikler, metalbiyomalzemeler, canlı hücreler.	Geniş biyomateryal penceresi, düşük maliyetli ekipman, yüksek verim ve verimlilik.	Yüksek en-boy oranlı yapılar üretmek zordur, isteğe bağlı damlalar için sıvı biyomürekkepleri n doğru şekilde dağıtılması gerekir.
İki fotonlu polimerizasyon	Işığa duyarlı reçinenin polimerizasyonunu başlatmak için iki lazer ışını tek bir noktaya odaklanır.	Fotobaşlatıcı biyopolimer sıvı reçine.	Son derece yüksek çözünürlük ve yüksek hız, geniş bir malzeme yelpazesi için fotobaşlatıcılar	Pahalı ekipman, yüksek yoğunluklu ışınlar hücrelere zarar verir.

Kaynak: (Zhang & Zhai., 2020) (Saadi & ark., 2022) (Wang & ark., 2022) (Hsueh & ark., 2021) (Zhang & ark., 2019) (He & ark., 2021) (Zhu & ark., 2019) (Ge & ark., 2020) (Creff & ark., 2019) (Li & ark., 2020) (Weisgrab & ark., 2020) (Zhang & ark., 2021)

4. Mikro ve nano ölçekli 3D baskı için akıllı biyomalzemeler

Malzeme bilimi ve biyomürekkep formülasyonlarındaki son gelişmeler, basılı yapıların çok yönlülüğünü ve işlevselliğini geleneksel biyofabrikasyon alanının ötesine genişletmiştir. Örneğin, kendi kendini iyileştirme ve şekil hafızası gibi dikkat çekici özelliklere sahip akıllı biyomalzemeler, son derece işlevsel iskelelerin ve biyolojik dokuların 3D baskısı için kullanılmıştır. Bu bölüm, aşağıdaki bölümlerde ele alınan biyopolimerler, akıllı hidrojeller, metal ve seramik biyomalzemeler gibi yaygın olarak kullanılan akıllı biyomalzemelere odaklanmaktadır.

4.1. Doku mühendisliği iskeleleri için akıllı biyopolimerler

Polimerler, mükemmel işleme kabiliyetleri, ayarlanabilir kimyaları ve düşük maliyetleri nedeniyle eklemeli üretim için yaygın olarak kullanılmaktadır. Biyoyoumlu ve biyolojik olarak parçalanabilen polimerler, doku mühendisliği ve rejeneratif tıp için en umut verici akıllı malzemeler olarak kabule dilmektedir. Genel olarak, akıllı biyopolimerler termoplastikler, reaktif monomerler, reçineler ve tozlar şeklindedir ve ışıkla kürlleme ve ısıyla ekstrüzyon prensiplerine dayalı çoklu 3D baskı işlemlerine olanak sağlar. En yaygın kullanılan biyopolimerler arasında poli(kaprolakton) (PCL), polilaktik asit (PLA), poli(propilen fumarat) (PPF) ve poliüretan (PU) bulunmaktadır. Katmanlı üretimdeki son gelişmeler, hücre davranışını iyileştirmek için doğal mikro çevreyi taklit edebilen yüksek çözünürlüklü doku mühendisliği iskeleleri oluşturmak için yeni stratejiler sunmaktadır. Biyo-nanomalzemeler, biyolojik özelliklerini geliştirmek için biyopolimerlerle birleştirilebilir. Ayrıca, polimerlerin moleküler yapısı ayarlanabilir olduğundan, çeşitli türevler kimyasal yollarla modifiye edilebilir.

PCL, in vivo implantasyondan sonra bozulan yapay dokular oluşturmak için en yaygın kullanılan biyopolimerdir. İmplant edilen PCL iskeleleri karbondioksit ve suya bozunur; PCL'nin biyolojik olarak parçalanabilir performansı, onu in vivo biyolojik ortama yanıt olarak sentetik iskelelerin uzamsal konformasyonunu değiştirmek için oldukça uygun hale getirir. PCL ayrıca çeşitli ilaç partikülleri ile birleştirildiğinde kontrollü ilaç salınımı için bir taşıyıcı olarak kullanılmıştır. Zhou ve ark. PCL, UV ışığı altında polimerizasyona izin veren akrilat uç grupları ile modifiye edilmiştir. İyi biyoyoumluluğa sahip 4D baskılı şekil hafızalı periferik stent, yeterli gerilme mukavemeti ve uzun süreli ilaç salınımı için yeterli esneklik göstermiştir. PCL, uyarıcıya duyarlı özelliklere ek olarak, hücre yapışmasını ve çoğalmasını teşvik eden ultra ince liflerin üretimine izin verir (Zhou & ark., 2021). Örneğin, 527 ± 56 nm genişliğinde mikroskop altı PCL lifleri üretmek için elektrohidrodinamik baskı geliştirilmiştir. Alt mikro ölçekli PCL liflerinin hücre yapışmasını ve göçünü kolaylaştırdığı gösterilmiştir. Bu, gelişmiş biyolojik işlevlere sahip çok ölçekli doku mühendisliği iskeleleri üretmek için umut verici bir stratejidir (Hu & ark., 2022).

PLA, mükemmel biyolojik bozunabilirliği, şekil hafızası özellikleri ve işleme performansı nedeniyle 3D veya 4D baskı için rekabetçi bir akıllı biyomateryal olarak kabul edilmektedir (Mehrrouya & ark., 2021). PLA'nın mükemmel viskozitesi ve termal performansı, onu ticari FDM 3D baskı teknolojisi ile üretime son derece uygun hale getirmektedir. Zhang ve arkadaşları, trakeal implantların hacmini azaltmak için umut verici bir strateji sağlayan, mükemmel şekil kurtarma davranışı sergileyen trakeal bir iskele olarak PLA/Fe₃O₄ kompozit bir yapı tasarlamış ve üretmiştir (Zhang & ark., 2021). Bu kompozit yapının şekil

hafızası davranışı, manyetik alanlar veya kızılötesi ışınlama ile tetiklenebilir ve tıbbi cihazlarda ve in vaziv cerrahide uzaktan manipülasyona olanak tanır. PLA'nın nispeten kararlı fiziksel ve kimyasal özellikleri, biyolojik işlevleri geliştirmek için çoklu yüzey modifikasyonlarına izin verir. Chen ve ark. Dof PLA Doğal kemiğin mekanik ve biyolojik özelliklerini taklit eden sentetik iskeleler oluşturmak için nano-hidroksiapatit yüzey kaplamaları ile birlikte baskı (Chen & ark., 2021). Nano-hidroksiapatit yüzey kaplamalarının hidrofilitliği ve hücre yapışma performansını önemli ölçüde artırdığı bulunmuştur. Biyonomalzemelerin işlem sonrası modifikasyonu, 3D baskılı PLA iskelelerinin yapısal ve biyolojik özelliklerini iyileştirmek için pratik bir strateji sağlar.

PPF ayrıca mükemmel biyoyumluluğu, mekanik özellikleri ve osteokondüktivitesi nedeniyle biyomedikal uygulamalar için biyolojik olarak parçalanabilen bir polimer olarak kullanılmıştır. PPF'nin termoplastiklik ve fotokroslinkin özellikleri, onu dijital ışık baskısı, stereolitografi ve kaynaşmış laminat kalıplama gibi çeşitli eklemeli üretim teknikleri için uygun bir malzeme haline getirmektedir. Aşağıda bunun en önemli örneklerinden bazıları yer almaktadır (Cai & ark., 2019). Fer ve arkadaşları yıldız şekilli PPF'leri başarılı bir şekilde sentezlemiş ve dijital ışık işlemi kullanarak minimum 4 µm özellik boyutuna sahip jiroid yapılar üretmiştir. Hazırlanan PPF iskelelerin şekil geri kazanım performansı, kürlenme sonrası süre ve uygulama sıcaklığı ile ayarlanabilmektedir. PPF tabanlı iskeleler, büyük kemik defektlerinin rejenerasyonu için olağanüstü emilebilirlik ve kompaktlık göstermiştir (Le Fer & ark., 2020).

Fiziksel veya kimyasal uyarılar, geleneksel biyopolimerleri şekil hafızası, çevresel tepki ve hatta hücre düzenlemesi gibi işlevlere sahip akıllı uygulamalara doğru taşımıştır. Tipik fiziksel uyarılar arasında sıcaklık düzenlemesi, aydınlatma, elektrik ve manyetik uyarım yer almaktadır (Xue & ark., 2022). Duyarlı biyopolimerlerin önemli bir grubu şekil hafızalı polimerlerdir. Metal ve seramik biyomalzemelerle karşılaştırıldığında, akıllı duyarlı biyopolimerler düşük yoğunluk, yüksek hassasiyet tepkisi ve mükemmel şekil geri kazanım performansı gibi çeşitli avantajlara sahiptir (Khalil & ark., 2022). Bu fiziksel veya kimyasal uyarılar, 3D baskılı yapıların yapısal veya biyolojik özelliklerini uyarlamak için çok yönlü bir yaklaşım sunar. Biyomedikal uygulamalarla ilgili olarak, stimülasyonla ayarlanan mikroyapısal şekil, hidrofilitlik, bozunabilirlik, çözünürlük ve polarite, doku rejenerasyonu, ilaç dağıtımı ve biyosensörler gibi biyolojik işlevleri kolaylaştırabilir (Chakrapani & ark., 2022).

4.2. Biyo-baskı için akıllı hidrojeller

Hidrojeller, büyük miktarlarda su içeren ve katı faz durumunu koruyan çapraz bağlı hidrofilik polimer zincirlerinden oluşan jöle benzeri maddelerdir (Qin & ark., 2022). Hidrojelin içinde sıvı tutulması fiziksel destek sağlar ve gözenekli yapıyı korur. Oluşan polimer zincirlerine bağlı olarak hidrojeller doğal olarak oluşan hidrojeller, sentetik polimer hidrojeller ve kompozit hidrojeller olarak sınıflandırılabilir. Doğal olarak elde edilen hidrojeller yaygın olarak bulunur ve insanlar, hayvanlar ve bitkiler gibi doğal organizmalardan elde edilebilir. Doğal olarak oluşan tipik hidrojeller başlıca selüloz, kitosan, aljinikasit, kolajen ve ipek fibroindir. Doğal polimerlerin yanı sıra hidrojeller poliakrilat, poli(etilen glikol) ve poli(vinil alkol) gibi sentetik polimer zincirleri ile üretilir. Kompozit hidrojeller, doğal veya sentetik polimer zincirlerinin iç içe geçmesiyle üretilir ve gelişmiş mekanik mukavemet ve fizyolojik özellikler sergiler. Hidrojellerin mekanik ve biyolojik özelliklerini modüle etmek için fonksiyonel katkı maddeleri de kullanılmıştır. Hidrojeller, 3D hidratlı gözenekli ortama hücre afinitesi kazandırabildikleri için biyofabrikasyonda yaygın olarak kullanılmaktadır. Doğal dokulara benzeyen karmaşık yumuşak yapılar üretmek için lazer tabanlı ve ekstrüzyon tabanlı işlemler gibi çok yönlü 3D baskı teknikleri geliştirilmiştir.

Hidrojellerin sulu ortamı ve gözenekli yapısı, biyoyumluluğu ve hücrel aktiviteyi teşvik ederek hidrojelleri doku rejenerasyonu ve anjiyogenez için akıllı iskelelerin geliştirilmesine son derece uygun hale getirmektedir (Liu & ark., 2022). Siebert ve ark. Jelatin metakrilohidrojel yamaları basılmıştır. UV ışınımı altında protein yapışmasını ve VEGF salınımını modüle etmek için ışığa duyarlı çinko oksit mikropartikülleri kullanılmıştır. Çinko oksit mikropartikülleri içeren kompozit hidrojeller istenen yapıda basıldı ve gelişmiş yara iyileşme performansına sahip akıllı bir pansuman platformu için umut verici bir strateji sağladı (Siebert & ark., 2021). Hidrojeller ayrıca doku büyümesini ve anjiyogenez teşvik etmek için akıllı iskelelerin üretimi içinde araştırılmıştır; Luo ve ark. aljinat ve jelatin içeren hidrojel iskelelerin kolayca üretilebileceğini bildirmiştir; 3D baskı ve yüzey çapraz bağlama birleştirilerek, istenen mikro gözenekli ve istenen mikro gözeneklere ve birbirine bağlanan kanallara sahip akıllı hidrojel iskeleler üretildi ve gelişmiş sıvı perfüzyonu ve anjiyojenik potansiyel gösterildi (Luo, Zhang & Lin, ark., 2022).

Hidrojeller, hücre dışı matrise benzer biyoyumlu ve biyoemilebilir bir 3D ortam yaratarak hücre kapsüllü biyoyapıların ve yapay organların basılması için uygun bir malzeme sistemi sağlar. Castilho, jelatin ve ipek fibroin içeren yeni bir hidrojel bazlı biyomürekkep bildirdi, 5-40µm özellik boyutlarına sahip iyi organize edilmiş hücreler içeren lifli yapılar (Castilho & ark., 2021). Bir elektrobaskı işlemi kullanılarak, 100 µm gözenekli ve altıgen, kare ve kavisli

desenler gibi özelleştirilmiş geometrilere sahip hücre yüklü yapılar üretildi. Hidrojel biyomürekkep üzerine basılan hücreler, biriktirme desenleriyle birlikte yüksek hayatta kalma oranları göstererek yüksek çözünürlüklü canlı yapıların imalatının önünü açmıştır. Biyoyapıların yanı sıra, hidrojellerin vitro yapay organlar oluşturmak içinde uygun bir malzeme olarak kullanılmıştır. Tang ve ark. jelatinmetakrilat (GelMA) hidrojel ve polilaktikasitten (PLA) yapılan 3D baskılı biyoaktif yapay kulaklobu sunmuştur (Tang & ark., 2021). Kondrositler, hem biyolojik hem de mekanik özelliklere sahip kişiselleştirilmiş bir kulak kepçesi oluşturmak için GelMA hidrojel biyomürekkebine yüklenmiştir. Kondrositlerin 8 haftalık implantasyondan sonra iyi hücre canlılığı ve proliferatif aktivite sergilediği gösterilmiştir. Hidrojeller, çapraz bağlanma ve uyarın-tepki özelliklerini takip ederek kendi kendini iyileştirme ve şekil hafızası gibi gelişmiş biyolojik işlevlere sahip katkılı üretim için akıllı malzemeler olarak araştırılmıştır. Kadumudi ve ark. İpek fibroine indirgenmiş grafen oksit ekleyerek mükemmel mekanik tokluk, uzama kapasitesi ve elektrik iletkenliği elde etmiştir. Geliştirilen çok işlevli hidrojeller mükemmel mekanik tokluğa, uzama kapasitesine ve elektrik iletkenliğine sahiptir (Kadumudi & ark., 2021). Ayrıca, geliştirilen çok işlevli hidrojellerin gelişmiş hiyerarşik bağlanma özelliklerine sahip olduğu, bionik algılama ve insan-makine arayüzlerinde kendi kendini iyileştirme yeteneklerini kolaylaştırdığı Ding vd. tarafından heterojen boyut dağılımı, ölçeklenebilir üretim ve kontrol edilebilir çapraz bağlanma özelliklerine sahip microflake hidrojel sistemleri rapor edilmiştir. Fotobaşlatıcılar ve aydınlatma ile birlikte mikro tanecikli hidrojeller, yüksek hücre canlılığı ve iyi tanımlanmış bir bileşime sahip deforme olabilen canlı yapılar üretmek için kullanılmıştır (Ding & ark., 2022).

4.3. Sert doku rejenerasyonu ve biyotıp için metalik ve seramik biyomalzemeler

Son yıllarda, gelişmiş metalik ve seramik biyomalzemelerin 3D baskısı hem temel araştırmalarda hem de ticari uygulamalarda hızlı bir büyüme göstermiştir. Metalik malzemelerin üstün mekanik mukavemeti, yorulma performansı ve korozyon direnci, onları çevre dokularında arzu edilen şekli ve biyolojik işlevi korumak için uygun hale getirir. Yaygın olarak kullanılan biyoyumlu metal malzemeler arasında çelik, titanyum alaşımları, magnezyum alaşımları ve tantal alaşımları bulunmaktadır. Metal implantların mekanik ve biyolojik özellikleri, mikroyapısal özelliklerin ve malzeme bileşiminin ayarlanmasıyla özelleştirilebilir. Yu ve arkadaşları, lazer toz yatağı eritme tekniği kullanarak Zn-Mg alaşımlı gözenekli iskelelerin laminat modellemesini rapor etmiştir (Liu & ark., 2022). Zn-Mg yapıları, süngerimsi kemiğe benzer şekilde

iyi bir basınç dayanımı ve modül sergilemiştir. 12 haftalık implantasyondan sonra, biyolojik olarak parçalanabilen Zn-Mg iskelelerin insaf Zn iskelelerine kıyasla kemik oluşumunu teşvik ettiği bulunmuştur. Metalik malzemelerin östenitik ve martensitik fazları arasındaki sıcaklık kaynaklı faz değişiklikleri, şekil hafızalı yapıların esneklik ve sertlik durumunu modüle etmek için incelenmiştir. Li ve ark. nikel-titanyum alaşımıyla çalışan yumuşak parmakların üretimi için 3D baskı ve otomatik dağıtımı entegre etmiştir (Li & ark., 2020). Yumuşak parmakların periyodik tek düze olmayan deformasyonu, uygulanan akım yoğunluğu ile indüklenmiş ve kontrol edilmiştir. Ayrıca, biyoelektronik ve tıbbi cihazlarda potansiyel uygulamaları olan, canlı organizmalar gibi biyomimetik hareketlere sahip bir yumuşak kavrama sistemi gerçekleştirilmiştir.

Farklı bileşimlere ve hiyerarşik yapılara sahip fonksiyonel biyoseramikler, kemik dokusu mühendisliği ve kemik tümörü tedavisi için büyük potansiyel göstermiştir. Kalsiyum fosfat seramikler, biyoaktif camlar ve kompozit seramiklerde dâhil olmak üzere çok çeşitli biyoseramikler 3D baskı teknolojisi kullanılarak üretilebilir. Biyoseramiklerin avantajları, özellikle fiziksel stabiliteleri, kimyasal dirençleri, mekanik özellikleri ve biyolojik olarak parçalanabilirlikleri, onları sert doku rejenerasyonu için ideal adaylar haline getirmektedir. Wang ve ark. ekstrüzyon tabanlı 3D baskı kullanarak Mg katkılı kalsiyum silikat biyoseramik iskeleler tasarladı ve üretti (Wang & ark., 2021). Titanyum alaşımlı iskelelerle karşılaştırıldığında, biyoseramik iskeleler stabil bir kemik-iskele arayüzüne sahipti ve üstün osseointegrasyon performansı gösterdi. In vitro deneyler, biyoseramik iskelelerdeki hücre çoğalma sayılarının titanyum alaşımlı iskelelere göre birkaç kat daha yüksek olduğunu gösterdi. 3D baskılı biyoseramik, biyoseramik iskelelerin biyofonksiyonelliği tedavi sonrası işlemlerle daha da değiştirilebilir. Dang ve ark. osteosarkomun sinerjik tedavisi için çok işlevli platformlar olarak 3D baskılı trikalsiyum fosfat biyoseramik iskelelerin yüzeyinde nikel nitrür ve doksorubisin kullanmıştır. Kaplama. Tüm iskeleler kemik grefti için uygun mekanik özellikler sergilemiş ve cerrahi müdahale sonrası çok işlevli kemik rekonstrüksiyonu için umut verici bir yaklaşım sağlamıştır.

Biyopolimerler, hidrojeller, metalik malzemeler ve biyoseramiklere ek olarak, bu malzemeleri birleştiren akıllı kompozitler de kullanılmıştır (Zhou & ark., 2022). Kapsamlı biyo-nanopartiküllerin karıştırılmasıyla, akıllı kompozitler mükemmel mekanik özellikler ve gelişmiş biyolojik özellikler elde edebilir (Chen & ark., 2020). Örneğin, Chen ve arkadaşları selüloz ve poli (3-hidroksibütirat-ko-3-hidroksivalerat) (PHBV)'den oluşan akıllı kompozit membranlar üzerinde çalışmıştır. Membran ayırma teknolojileri düşük maliyet, yüksek verimlilik ve çevresel sürdürülebilirlik gibi birçok avantaj sunarak çeşitli

endüstrilerde devrim yaratmıştır. Bu teknolojiler, boyut, yük veya diğer özelliklerdeki farklılıklara dayalı olarak belirli maddeleri ayıran ince membran bariyerleri kullanır. Membranlar, akış yolunun boyutuna ve karakteristik ölçeğine bağlı olarak makrofluidik, mikrofluidik ve nanofluidik membranlar olarak geniş bir şekilde sınıflandırılabilir. Makrokanallı membranlar, tipik olarak milimetre ile santimetre aralığında daha büyük akış kanalı boyutlarına sahiptir. Daha büyük partiküller ve daha yüksek akış hızları gerektiren uygulamalar için tasarlanmıştır ve kimya, çevre, ilaç ve madencilik dâhil olmak üzere çeşitli endüstrilerde ön arıtma işlemlerinde yaygın olarak kullanılırlar (Yuan & ark., 2019). Mikrokanal membranların akış kanalı boyutu makrokanallardan daha küçüktür, ancak nanokanallara kıyasla hala nispeten büyüktür. Tipik olarak, akış kanalı çapı onlarca ila yüzlerce mikrondur. Mikroakışkanlar, kimyasal sentez ve biyomedikal cihazlarda çeşitli uygulamaları vardır. Nano-kanal membranlar tipik olarak nanometre boyutunda akış kanallarına sahiptir. Bu membranlar, moleküllerin ve iyonların taşınmasını hassas bir şekilde kontrol etmek için son derece küçük kanal boyutlarıyla tasarlanmıştır. Su arıtma, iyon seçiciliği, gaz ayırma, DNA dizileme, protein analizi ve ilaç dağıtım sistemlerigibi çeşitli uygulamalarda yaygın olarak kullanılırlar. Her membran ölçeğinin avantajları ve dezavantajları vardır ve membran seçimi özel ayırma gereksinimlerine, hedef moleküllere ve iyonlara ve çalışma koşullarına bağlıdır (Kim & ark., 2022). Sert selülozun PHBV'nin yapısal homojenliğini, kristalizasyon kapasitesini ve hidrofiliğini geliştirdiği bulunmuştur. Bu kompozit membran, ilaç dağıtım sistemleri için uzun vadeli ve akıllısalım davranışı elde etmek üzere daha da geliştirilmiştir. Sert doku rekonstrüksiyonu için sert malzeme kompozitleri de geliştirilmiştir. Tipik sert malzeme kompozitleri hidroksiapatit, biyoglaslar, seramik kompozitler ve alaşımları içerir. Biyolojik olarak türetilmiş polimerler ve sentetik malzemeler gibi diğer katkı grupları da belirli işlevlere sahip akıllı biyopolimerler oluşturmak için kullanılmıştır. Genel olarak, farklı malzeme gruplarının kombinasyonu, 3D baskılı yapıların işleme yeteneklerinin, yapısal ipuçlarının ve akıllı biyo-fonksiyonlarının üstesinden gelmek için pratik bir yol sağlar.

5. Zorluklar ve gelecek beklentileri

Mikro ve nano ölçekli 3D baskı, karmaşıklık, özelleştirilebilirlik, işleme esnekliği ve uygun maliyetli üretim açısından benzersiz avantajlara sahip biyomalzemelerin üretimi için umut verici bir yaklaşım sunmaktadır (Zhang & ark., 2022). Uygulamalı biyomalzemeler, istenen yapıların üretilmesinde ve basılı yapılarla ilişkili biyolojik işlevlerin gerçekleştirilmesinde önemli bir rol oynayan uygun fiziksel, kimyasal ve biyolojik özellikler gerektirir (Wang & ark.,

2021). Uygulanabilir biyomürekkeplerin ve biyoyumlu malzemelerin eksikliği, 3D biyo-baskının ilerlemesinin önündeki en önemli engel olabilir. İyi işleme kararlılığı ve yüksek baskı çözünürlüğü genellikle gelişmiş yapısal doğruluk ve biyolojik işlevsellik sağlar. Bununla birlikte, iyi basılabilirliğe ve yüksek baskı hassasiyetine sahip biyomalzemeler genellikle sınırlı biyolojik özelliklere sahiptir. Örneğin, lazer kaynaklı 3D baskı teknolojisi, biyoyumluluğu tehlikeye atabilecek ve biyomedikal uygulamaları sınırlayabilecek ışığa duyarlı reçineler gerektirir (Hwangbo & ark., 2021). Bu nedenle, mükemmel işleme kararlılığına, baskı hassasiyetine ve yüksek kullanılabilirliğe sahip yeni nesil biyomürekkeplerin ve biyomalzemelerin geliştirilmesi gelecekteki araştırmaların odak noktası olabilir. Ayrıca, doğal dokuların mikro ölçekten nano ölçeğe kadar değişen çok ölçekli bir mimariye sahip olduğu iyi bilinmektedir (Chansoria & ark., 2022). Mevcut eklemeli üretim teknolojilerinin çoğu tek ölçekli yapıların üretimine yönelik stratejiler sunmaktadır. Kontrollü hücre davranışı ve biyolojik işlevlere sahip çok ölçekli mimarileri taklit etmek hala zordur. Yüksek hassasiyetli makine platformları, doğru malzeme tedarik sistemleri ve süreç kontrolü için yazılım açısından bu sorunun üstesinden gelmek için gelecekteki çabalara ihtiyaç vardır.

3D baskı teknolojisi ve akıllı biyomalzemelerin entegrasyonu henüz yeni başlamıştır. Yakın gelecekte malzeme sistemleri ve baskı stratejileri açısından muazzam gelişmeler yaşanacaktır. Biyolojik aktivite, hücre canlılığı ve uzun süreli implantasyon için biyolojik olarak parçalanabilirlik gibi basılı yapıların biyolojik işlevlerindeki ilerlemelerle, basılabilir akıllı biyomalzemelerin yelpazesinin ve çeşitliliğinin genişlemesi beklenmektedir. Şu anda, basılı yapıların yapısal doğruluğu ve biyolojik özellikleri genellikle izole bir şekilde çalışılmakta ve tasarım, üretim ve biyolojik özellikler arasındaki temel bağlantıya yeterince dikkat edilmemektedir. Gelecekteki atılımlar için potansiyel bir yaklaşım, biyomateryal özelliklerini, mikroyapısal doğruluğu ve biyolojik işlevi entegre bir parça olarak kapsamlı bir şekilde ele almaktır. Biyomalzemelerin özellikleri ve basılabilirliği, moleküler yapı, çevresel koşullar, işleme parametreleri ve modifikasyon yöntemleri gibi önemli faktörlerden etkilenebilir (Shokrani & ark., 2022). Akıllı biyomalzemelerin tasarlanması ve üretilmesi için makine öğrenimi gibi gelişmiş tasarım yöntemleri kullanılabilir. Gelişmiş biyolojik işlevlere sahip çeşitli akıllı biyomalzemeler geliştirilmiştir, ancak şekil kontrolü ve kendi kendini iyileştirme gibi akıllı performansın temel ilkeleri daha fazla araştırma gerektirmektedir. Makine mühendisliği, malzeme bilimi, biyotıp ve bilgisayar bilimi gibi birden fazla disiplinin bir araya getirilmesiyle çığır açan bir potansiyel elde edilebilir. Hassas 3D baskı teknolojisi ve akıllı biyomalzemelerin bir araya gelmesinin teknolojik ilerlemeyi kolaylaştıracağı ve

akıllı biyoelektronik, kişiselleştirilmiş tıbbi cihazlar ve hatta canlı organlar alanlarında geniş bir uygulama yelpazesine olanak sağlayacağı öngörülmektedir.

Sonuç

Akıllı biyomalzemeler, mikro veya nano ölçekli işlevsel mimariler oluşturmak için çok yönlü 3D baskı teknikleriyle araştırılmış ve üretilmiştir. Bu araştırma temel olarak son teknoloji ürünü akıllı biyomalzemelerin malzeme özelliklerine ve farklı işlevlerine odaklanmaktadır. Okuyucuya bazı arka plan bilgileri sağlamak için çeşitli 3D baskı teknolojileri kısaca tanıtılmaktadır. Biyomalzemelerin akıllı özellikleri, altta yatan fiziksel, kimyasal veya biyolojik ilkelere dayanmaktadır. Akıllı biyomalzemelerin spesifik özellikleri, elektrik ve manyetik alanlar, sıcaklık, çevresel pH ve çevresel nem gibi çeşitli dış uyaranlarla tetiklenir, ancak mevcut akıllı biyomalzemelerin çoğunun yalnızca tek bir işlevi ve tek bir uyararı vardır. Birden fazla işlevi ve uyararı olan akıllı biyomalzemelerin keşfedilmesine büyük ihtiyaç vardır. Bu çalışmada biyopolimerler, hidrojeller, metaller ve seramikler gibi tipik akıllı biyomalzemeler özetlenmektedir. Tipik olarak, bu biyomalzemeler farklı 3D baskı tekniklerinin gereksinimlerini karşılamak için tozlar, lifler veya reçineler şeklindedir. 3D baskı türünü seçerken, biyomalzemenin özellikleri, gerekli doğruluk ve katılma prensibi kapsamlı bir şekilde dikkate alınmalıdır. İşleme kapasitesi ve baskı doğruluğu ile ilgili olarak, ince biyolojik özelliklere sahip yüksek çözünürlüklü akıllı mimariler üretmek hala zordur. Biyomalzemeler, mühendislik ve tıp alanındaki yeni atılımlarla birlikte, 3D baskı ile ilgili akıllı biyomalzemeler doku rejenerasyonu, biyotıp ve akıllı biyosensörler alanlarında mikro ve nano ölçekli biyolojik yapıların üretimi için yenilikçi yaklaşımlar yaratabilir

Özetle, atomik kalınlığa ve mükemmel fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip nanomalzeme ailelerinin ortaya çıkması, nano-kanal membranlar için önemli geliştirme fırsatları yaratmıştır. Onlarca yıllık gelişim sürecinde, nanomalzeme bazlı membranlar hammaddeden laboratuvar düzeyindeki uygulamalara kadar büyük adımlar atılmıştır.

REFERANSLAR

- Zhu Y, Joralmon D, Shan W, et al. 3D printing biomimetic materials and structures for biomedical applications. *Bio-Design and Manufacturing* 2021, 4:405–428. [https://doi.org/ 10.1007/s42242-020-00117-0](https://doi.org/10.1007/s42242-020-00117-0).
- Zhang Q, Bei H-P, Zhao M, et al. Shedding light on 3D print-png: printing photocrosslinkable constructs for tissue engineering. *Biomaterials* 2022:121566. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2022.121566>.
- Bao Y, Paunovic N, Leroux JC. Challenges and opportunities in 3D printing of biodegradable medical devices by emerging photopolymerization techniques. *Adv Funct Mater* 2022, 32: 2109864. <https://doi.org/10.1002/adfm.202109864>.
- Guo AX, Cheng L, Zhan S, et al. The powder-based 3D printed alloys on titanium-based biomaterial applications: a review. *J Mater Sci Technol* 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2021.11.084>.
- Bobrin VA, Lee K, Zhang J, et al. Nanostructure control in 3D printed materials. *Adv Mater* 2022, 34:2107643. [https://doi.org/ 10.1002/adma.202107643](https://doi.org/10.1002/adma.202107643).
- Carthew J, Abdelmaksoud HH, Cowley KJ, et al. Next generation cell culture tools featuring micro-and nanotopographies for biological screening. *Adv Funct Mater* 2022, 32:2100881. <https://doi.org/10.1002/adfm.202100881>.
- Amukarimi S, Rezvani Z, Eghtesadi N, et al. Smart Bio-materials: from 3D printing to 4D bioprinting. *Methods* 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ymeth.2022.07.006>.
- Amukarimi S, Ramakrishna S, Mozafari M: Smart biomaterials—a proposed definition and overview of the field. *Curr Opin Biomed Eng* 2021, 19:100311. <https://doi.org/10.1016/j.cobme.2021.100311>.
- Chen X, Zhong Q, Cui C, et al.: Extremely tough, punctureresistant, transparent, and photoluminescent polyurethane elastomers for crack self-diagnose and healing tracking. *ACS Appl Mater Interfaces* 2020, 12:30847–30855. [https://doi.org/ 10.1021/acsami.0c07727](https://doi.org/10.1021/acsami.0c07727).
- Skardal A, et al. Bioprinted amniotic fluid-derived stem cells accelerate healing of large skin wounds. *Stem Cells Transl Med* 2012;1(11):792-802.
- Ibrahim A. 3D bioprinting bone. *3D Bioprinting Reconstruct Surg* 2018:245– 75.
- Hull CW. 3D baskının doğuşu. *ResTechnol Manag* 2015;58(6):25-30.
- Huang Y, et al. 3D bioprinting and the current applications in tissue engineering. *Biotechnol J* 2017;12(8):1600734.
- Kerour edan, O., et al., Laser-assisted bioprinting of cells for tissue engineering. *Laser printing of functional materials: 3D microfabrication, electronics and biomedicine*, 2018: p. 3

- Goldman SM, Barabino GA. Cultivation of agarose-based microfluidic hydrogel promotes the development of large, full-thickness, tissue-engineered articular cartilage constructs. *J Tissue Eng Regen Med* 2017;11(2):572–81.
- Gu Z, et al. Development of 3D bioprinting: from printing methods to biomedical applications. *Asian J Pharm Sci* 2020;15(5):529–57.
- Li X, et al. Inkjet bioprinting of biomaterials. *Chem Rev* 2020;120(19):10793– 833.
- Chen EP, et al. 3D Bioprinting of Vascularized Tissues for in vitro and in vivo Applications. *Front Bioeng Biotechnol* 2021;9.
- Bakarich SE, et al. 4D Printing with mechanically robust, thermally actuating hydrogels. *Macromol Rapid Commun* 2015;36(12):1211-7.
- Vijayaven kataraman S, Lu W, Fuh JYH. 3D biyo-baskı-etik, yasal ve sosyal yönler (ELSA) çerçevesi. *Bioprinting* 2016;1:11-21.
- Zhang, M., Zhao, X., Zhang, G., Wei, G., Su, Z. Electrospinning design of functional nanostructures for biosensor applications (2017) *Journal of Materials Chemistry B*, 5 (9), pp. 1699-1711. Cited 147 times. <http://pubs.rsc.org/en/journals/journal/tb> doi: 10.1039/c6tb03121h.
- Xue, J., Xie, J., Liu, W., Xia, Y. Electrospun Nanofibers: New Concepts, Materials, and Applications (2017) *Accounts of Chemical Research*, 50 (8), pp. 1976-1987. Cited 772 times. <http://pubs.acs.org/journal/achre4> doi: 10.1021/acs.accounts.7b00218.
- Yang, G., Li, X., He, Y., Ma, J., Ni, G., Zhou, S. From nano to micro to macro: Electrospun hierarchically structured polymeric fibers for biomedical applications (2018) *Progress in Polymer Science*, 81, pp. 80-113. Cited 253 times. <http://www.sciencedirect.com/science/journal/00796700> doi:10.1016/j.progpolymsci.2017.12.003.
- Beigmoradi, R., Samimi, A., Mohebbi-Kalhari, D. Fabrication of polymeric nanofibrous mats with controllable structure and enhanced wetting behavior using one-step electrospinning (2018) *Polymer*, 143, pp. 271-280. Cited 29 times. <http://www.journals.elsevier.com/polymer/> doi: 10.1016/j.polymer.2018.04.025.
- Wang Z, Wu Y, Wu D, et al.: Soft magnetic composites for highly deformable actuators by four-dimensional electro-hydrodynamic printing. *Compos B Eng* 2022, 231:109596. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.109596>.
- Rahim TNAT, Abdullah AM, Md Akil H: Recent developments in fused deposition modeling-based 3D printing of polymers and their composites. *Polym Rev* 2019, 59:589–624. <https://doi.org/10.1080/15583724.2019.1597883>.

- Liu Q, Zhai W: Hierarchical porous ceramics with distinctive microstructures by emulsion-based direct ink writing. *ACS Appl Mater Interfaces* 2022. <https://doi.org/10.1021/acsami.2c03245>.
- He J, Zhang B, Li Z, et al.: High-resolution electrohydrodynamic bioprinting: a new biofabrication strategy for biomimetic micro/nanoscale architectures and living tissue constructs. *Biofabrication* 2020, 12. <https://doi.org/10.1088/1758-5090/aba1fa.042002>.
- Barui S: 3D inkjet printing of biomaterials: principles and applications. *Medical Devices & Sensors* 2021, 4, e10143. <https://doi.org/10.1002/mds3.10143>.
- Dubbin K, Dong Z, Park DM, et al.: Projection microstereolithographic microbial bioprinting for engineered biofilms. *Nano Lett* 2021, 21:1352–1359. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.0c04100>.
- Zhang L, Song B, Yang L, et al.: Tailored mechanical response and mass transport characteristic of selective laser melted porous metallic biomaterials for bone scaffolds. *Acta Biomater* 2020, 112:298–315. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2020.05.038>.
- Saadi, M. Maguire, A. Pottackal, N.T. *et al.* Direct ink writing: a 3D printing technology for diverse materials *Adv Mater* (2022), p. 2108855, [10.1002/adma.202108855](https://doi.org/10.1002/adma.202108855).
- Wang, L. Yang, C. Sun, C. *et al.* Fused deposition modeling PEEK implants for personalized surgical application: from clinical need to biofabrication *Int J Bioprinting*, 8 (2022), [10.18063/ijb.v8i4.615](https://doi.org/10.18063/ijb.v8i4.615).
- Hsueh, M.-H. Lai, C.-J. Wang, S.-H. *et al.* Effect of printing parameters on the thermal and mechanical properties of 3d-printed pla and petg, using fused deposition modeling *Polymers*, 13 (2021), p. 1758, [10.3390/polym13111758](https://doi.org/10.3390/polym13111758).
- Zhang, B. He, J. Li, J. *et al.* Microscale electrohydrodynamic printing of in situ reactive features for patterned ZnO nanorods *Nanotechnology*, 30 (2019), p. 475301, [10.1088/1361-6528/ab3db4](https://doi.org/10.1088/1361-6528/ab3db4).
- He, J. Hao, G. Meng, Z. *et al.* Expanding melt-based electrohydrodynamic printing of highly-ordered microfibrillar architectures to cm-height via in situ charge neutralization *Advanced Materials Technologies*, 7 (2021), p. 2101197, [10.1002/admt.202101197](https://doi.org/10.1002/admt.202101197).
- Zhu, M. Duan, Y. Liu, N. *et al.* Electrohydrodynamically printed high-resolution full-color hybrid perovskites *Adv Funct Mater*, 29 (2019), p. 1903294, [10.1002/adfm.201903294](https://doi.org/10.1002/adfm.201903294).
- Ge, Q. Li, Z. Wang, Z. *et al.* Projection micro stereolithography based 3D printing and its applications *Int J Extrem Manuf*, 2 (2020), [10.1088/2631-7990/ab8d9a](https://doi.org/10.1088/2631-7990/ab8d9a).

- Creff, J. Courson, R. Mangeat, T. *et al.* Fabrication of 3D scaffolds reproducing intestinal epithelium topography by high-resolution 3D stereolithography *Biomaterials*, 221 (2019), p. 119404, 10.1016/j.biomaterials.2019.119404.
- Li, X. Liu, B. Pei, B. *et al.* Inkjet bioprinting of biomaterials *Chem Rev*, 120 (2020), pp. 10793-10833, 10.1021/acs.chemrev.0c00008.
- Weisgrab, G. Guillaume, O. Guo, Z. *et al.* 3D Printing of large-scale and highly porous biodegradable tissue engineering scaffolds from poly (trimethylene-carbonate) using two-photon-polymerization *Biofabrication*, 12 (2020), 10.1088/1758-5090/abb539.
- Zhang, S. Li, S. Wan, X. *et al.* Ultrafast, high-resolution and large-size three-dimensional structure manufacturing through high-efficiency two-photon polymerization initiators *Addit Manuf*, 47 (2021), p. 102358, 10.1016/j.addma.2021.102358.
- Zhou, Y. Zhou, D. Cao, P. *et al.* 4D printing of shape memory vascular stent based on β CD-g-Polycaprolactone *Macromol Rapid Commun*, 42 (2021), p. 2100176, 10.1002/marc.202100176.
- Hu, S. Meng, Z. Zhou, J. *et al.* Enhanced attachment and collagen type I deposition of MC3T3-E1 cells via electrohydrodynamic printed sub-microscale fibrous architectures *International Journal of Bioprinting*, 8 (2022), p. 514, 10.18063/ijb.v8i2.514.
- Mehrpouya, M. Vahabi, H. Janbaz, S. *et al.* 4D printing of shape memory polylactic acid (PLA) *Polymer*, 230 (2021), p. 124080, 10.1016/j.polymer.2021.124080.
- Zhang, F. Wen, N. Wang, L. *et al.* Design of 4D printed shape-changing tracheal stent and remote controlling actuation *Int J Soc Netw Min*, 12 (2021), pp. 375-389, 10.1080/19475411.2021.1974972.
- Chen, W. Nichols, L. Brinkley, F. *et al.* Alkali treatment facilitates functional nano-hydroxyapatite coating of 3D printed polylactic acid scaffolds *Mater Sci Eng C*, 120 (2021), p. 111686, 10.1016/j.msec.2020.111686.
- Cai, Z. Wan, Y. Becker, M.L. *et al.* Poly (propylene fumarate)-based materials: synthesis, functionalization, properties, device fabrication and biomedical applications *Biomaterials*, 208 (2019), pp. 45-71, 10.1016/j.biomaterials.2019.03.038.
- Le Fer, G. Becker, M.L. 4D printing of resorbable complex shape-memory poly (propylene fumarate) star scaffolds *ACS Appl Mater Interfaces*, 12 (2020), pp. 22444-22452, 10.1021/acsami.0c01444.
- Xue, J. Ge, Y. Liu, Z. *et al.* Photoprogrammable moisture-responsive actuation of a shape memory polymer film *ACS Appl Mater Interfaces*, 14 (2022), pp. 10836-10843, 10.1021/acsami.1c24018.

- Khalil, H.A. Yahya, E.B. Jummaat, F. *et al.* Biopolymers based Aerogels: a review on revolutionary solutions for smart therapeutics delivery *Prog Mater Sci* (2022), p. 101014, 10.1016/j.pmatsci.2022.101014.
- Chakrapani, G. Zare, M. Ramakrishna, S. Intelligent hydrogels and their biomedical applications *Materials Advances* (2022), 10.1039/D2MA00527A.
- Qin, Y. Liu, A. Guo, H. *et al.* Additive manufacturing of Zn-Mg alloy porous scaffolds with enhanced osseointegration: in vitro and in vivo studies *Acta Biomater*, 145 (2022), pp. 403-415, 10.1016/j.actbio.2022.03.055.
- Liu, S. Zhang, H. Ahlfeld, T. *et al.* Evaluation of different crosslinking methods in altering the properties of extrusion-printed chitosan-based multi-material hydrogel composites *Bio-Design and Manufacturing* (2022), pp. 1-24, 10.1007/s42242-022-00194-3.
- Siebert, L. Luna-Cerón, E. García-Rivera, L.E. *et al.* Light-controlled growth factors release on tetrapodal ZnO-incorporated 3D-printed hydrogels for developing smart wound scaffold *Adv Funct Mater*, 31 (2021), p. 2007555, 10.1002/adfm.202007555.
- Luo, Y. Zhang, T. Lin, X. 3D printed hydrogel scaffolds with macro pores and interconnected microchannel networks for tissue engineering vascularization *Chem Eng J*, 430 (2022), p. 132926, 10.1016/j.cej.2021.132926.
- Castilho, M. Levato, R. Bernal, P.N. *et al.* Hydrogel-based bioinks for cell electrowriting of well-organized living structures with micrometer-scale resolution *Biomacromolecules*, 22 (2021), pp. 855-866, 10.1021/acs.biomac.0c01577.
- Tang, P. Song, P. Peng, Z. *et al.* Chondrocyte-laden GelMA hydrogel combined with 3D printed PLA scaffolds for auricle regeneration *Mater Sci Eng C*, 130 (2021), p. 112423, 10.1016/j.msec.2021.112423.
- Kadumudi, F.B. Hasany, M. Pierchala, M.K. *et al.* The manufacture of unbreakable bionics via multifunctional and self-healing silk-graphene hydrogels *Adv Mater*, 33 (2021), p. 2100047, 10.1002/adma.202100047.
- Ding, A. Jeon, O. Cleveland, D. *et al.* Jammed micro-flake hydrogel for four-dimensional living cell bioprinting *Adv Mater*, 34 (2022), p. 2109394, 10.1002/adma.202109394.
- Li, D. Niu, D. Ye, G. *et al.* Intergrated shape memory alloys soft actuators with periodic and inhomogeneous deformations by modulating elastic tendon structures *Adv Eng Mater*, 22 (2020), p. 2000640, 10.1002/adem.202000640.
- Wang, S. Huang, Z. Liu, L. *et al.* Design and study of in vivo bone formation characteristics of biodegradable bioceramic *Mater Des*, 212 (2021), p. 110242, 10.1016/j.matdes.2021.110242.

- Zhou, L. Yang, H. Zhang, Z. *et al.* Effects of ligands in rare earth complex on properties, functions, and intelligent behaviors of polyurea–urethane composites *Polymers*, 14 (2022), p. 2098, 10.3390/polym14102098
- Chen, Y. Abdalkarim, S.Y.H. Yu, H.-Y. *et al.* Double stimuli-responsive cellulose nanocrystals reinforced electrospun PHBV composites membrane for intelligent drug release *Int J Biol Macromol*, 155 (2020), pp. 330-339, 10.1016/j.ijbiomac.2020.03.216
- Yuan S, Li X, Zhu J, Zhang G, Van Puyvelde P, Van der Bruggen B. Covalent organic frameworks for membrane separation. *Chem Soc Rev* 2019;48:2665-81.
- Kim JH, Choi Y, Kang J, et al. Shear-induced assembly of high-aspect-ratio graphene nanoribbon nanosheets in a confined microchannel: Membrane fabrication for ultrafast organic solvent nanofiltration. *Carbon* 2022;191:563-70..
- Zhang, L. Wang, B. Song, B. *et al.* 3D printed biomimetic metamaterials with graded porosity and tapering topology for improved cell seeding and bone regeneration *Bioact Mater* (2022), 10.1016/j.bioactmat.2022.07.009
- Wang, S. Hashemi, S. Stratton, S. *et al.* The effect of physical cues of biomaterial scaffolds on stem cell behavior *Advanced Healthcare Materials*, 10 (2021), p. 2001244, 10.1002/adhm.202001244
- Hwangbo, N.-K. Nam, N.-E. Choi, J.-H. *et al.* Effects of the washing time and washing solution on the biocompatibility and mechanical properties of 3D printed dental resin materials *Polymers*, 13 (2021), p. 4410, 10.3390/polym13244410
- Chansoria, P. Asif, S. Gupta, N. *et al.* Multiscale anisotropic tissue biofabrication via bulk acoustic patterning of cells and functional additives in hybrid bioinks *Advanced Healthcare Materials*, 11 (2022), p. 2102351, 10.1002/adhm.202102351
- Shokrani, H. Shokrani, A. Saeb, M.R. Methods for biomaterials printing: a short review and perspective *Methods* (2022), 10.1016/j.ymeth.2022.07.016

