

TÜRKİYE VE DÜNYADA MÜHENDİSLİK

Editör: Doç.Dr. Hüseyin GÜRBÜZ

yaz
yayınları

Türkiye ve Dünyada Mühendislik

Editör

Doç.Dr. Hüseyin GÜRBÜZ

yaz
yayınları

2025

Türkiye ve Dünyada Mühendislik

Editör: Doç.Dr. Hüseyin GÜRBÜZ

© YAZ Yayınları

Bu kitabın her türlü yayın hakkı Yaz Yayınları'na aittir, tüm hakları saklıdır. Kitabın tamamı ya da bir kısmı 5846 sayılı Kanun'un hükümlerine göre, kitabı yayınlayan firmanın önceden izni alınmaksızın elektronik, mekanik, fotokopi ya da herhangi bir kayıt sistemiyle çoğaltılamaz, yayınlanamaz, depolanamaz.

E_ISBN 978-625-8678-47-5

Aralık 2025 – Afyonkarahisar

Dizgi/Mizanpaj: YAZ Yayınları

Kapak Tasarım: YAZ Yayınları

YAZ Yayınları. Yayıncı Sertifika No: 73086

M.İhtisas OSB Mah. 4A Cad. No:3/3
İscehisar/AFYONKARAHİSAR

www.yazyayinlari.com

yazyayinlari@gmail.com

İÇİNDEKİLER

Borosilikat Camların Üretiminde Kullanılan Oksitlerin Etkisi.....	1
<i>Betül DEMİREZEN</i>	
Yapay Zeka Destekli Hassas Tarım: Derin Öğrenme ile Yabani Ot Tespitinde Yeni Nesil Çözümler.....	12
<i>Ayşe ÇELİK</i>	
Hydrogen Energy in Vehicles: Technologies and Trends.....	35
<i>Gökhan ÖZTÜRK, Müjdat FIRAT</i>	
Organik Asitlerin Hidrometalurjide Kullanımı	59
<i>Seda DEMİRCİ</i>	
Elektrokardiyografi ile Fizyolojik Sinyal İzleme: Temel İlkeler ve Modern Uygulamalar	72
<i>Elif AKTEPE</i>	
Biyoyazıcılarda Yapay Zekânın Etkisi.....	88
<i>Aysu AKILLI ARI</i>	
Mobilya Kapaklarında Görsel ve Dokunsal Etki Yaratma Yöntemleri: Uv Baskı ve Lazer Kazıma	105
<i>Kadir KAYAHAN</i>	
Yapay Zekâ Temelli Yöntemlerle Et ve Et Ürünlerinde Nesne Tespiti.....	118
<i>Hasan İbrahim KOZAN, Hasan Ali AKYÜREK</i>	
Et ve Et Ürünlerinde Yapay Zeka Tabanlı Tahribatsız Analiz Teknikleri.....	149
<i>Hasan İbrahim KOZAN, Hasan Ali AKYÜREK</i>	

"Bu kitapta yer alan bölümlerde kullanılan kaynakların, görüşlerin, bulguların, sonuçların, tablo, şekil, resim ve her türlü içeriğin sorumluluğu yazar veya yazarlarına ait olup ulusal ve uluslararası telif haklarına konu olabilecek mali ve hukuki sorumluluk da yazarlara aittir."

BOROSİLİKAT CAMLARIN ÜRETİMİNDE KULLANILAN OKSİTLERİN ETKİSİ

Betül DEMİREZEN¹

1. GİRİŞ

Borosilikat camların üretiminde kullanılan temel bor oksit bileşeni genellikle borik asitten (H_3BO_3) elde edilmektedir. Üretim sürecinde yüksek oranlarda sodyum oksit ilavesinin tolere edilebildiği durumlarda ise boraks ($Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$) etkili bir bor oksit kaynağı olarak değerlendirilmektedir. Laboratuvar cam malzemeleri ve ısıya dayanıklı ev gereçleri gibi borosilikat camların üretiminde, bor oksit (B_2O_3) ve sodyum oksit (Na_2O) dengesinin sağlanabilmesi amacıyla çoğunlukla borik asit ve boraks belirli oranlarda birlikte kullanılmaktadır (Karasu ve ark., 2020). Ayrıca cam formülasyonlarında kolemanit de önemli bir bor oksit hammaddesi olarak yer almaktadır (Polat, 2024).

Borosilikat camlar genellikle yaklaşık %79–80 silika, %13 borik oksit, %4–5 sodyum oksit ve %2–3 alüminyum oksitten oluşan bir bileşime sahiptir (Bengisu; 2016). Bu cam türünün camlaşma sıcaklığı çoğunlukla 820–840 °C aralığında değişmektedir. Yapısında bulunan bor elementinin düşük atom numarasına bağlı olarak, borosilikat camlar soda–kireç esaslı camlara kıyasla daha düşük bir yoğunluk sergilemekte olup bu değer yaklaşık 2.23 g/cm^3 mertebesindedir. Ayrıca yaklaşık $3 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ düzeyindeki düşük termal genleşme katsayısı (20

¹ Öğr. Gör. Dr. Kütahya Sağlık Bilimleri Üniversitesi, Simav Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu, ORCID: 0000-0003-3458-5847.

°C’de), borosilikat camların ani sıcaklık değişimlerine karşı yüksek direnç göstermesini sağlamaktadır.

Bu özelliklerin bir sonucu olarak borosilikat camlar, suya ve asidik ortamlara karşı üstün kimyasal dayanımın yanı sıra iyi düzeyde elektriksel yalıtım özellikleri sergilemektedir. Düşük termal genleşme katsayısı ile yüksek kimyasal kararlılığın birlikte sağlanması, söz konusu camların özellikle laboratuvar ekipmanları, ısıya dayanıklı fırın kapları ve benzeri uygulamalarda yaygın olarak tercih edilmesine olanak tanımaktadır.

Bor oksit, düşük ısıl genleşme katsayısının hedeflendiği cam türlerinde temel bir bileşen olarak tercih edilmekte olup, ısıya maruz kalınan ortamlarda yani fırın camları açısından kritik öneme sahiptir. Üretim sürecinde bor, ergime ve camlaşma davranışını iyileştirmenin yanı sıra katılmış camın optik kararlılığını desteklemekte; yüzey parlaklığını artırarak çizilmeye ve yansımaya karşı direnci güçlendirmektedir. Cam elyafı üretiminde ise bor oksit; ergime sıcaklığını düşürmesi, kristalleşme eğilimini azaltması, daha uzun lif oluşumuna imkân tanınması gibi önemli katkılar sağlamaktadır.

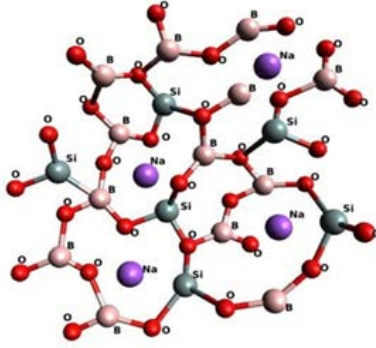
Borosilikat camlar, sahip oldukları kimyasal ve termal kararlılık sayesinde geniş bir uygulama alanına sahiptir (Lian ve ark., 2024). Tekstil ve yalıtım amaçlı cam elyaflarının üretiminde, sıvı kristal ekranlarda, laboratuvar ekipmanlarında, otomotiv sektöründe far ve sinyal lambası camlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra, fiber camlar, LCD ve ekran camları gibi ileri teknoloji ürünlerinde önemli bir bileşen olarak yer almaktadır. Bor içeriği sayesinde yüksek radyasyon dayanımı ve zırhlama uygulamalarda tercih edilen özel borlu camlar ise uzay teknolojileri, elektronik endüstrisi ve nükleer reaktörler gibi stratejik alanlarda yürütülen araştırma ve geliştirme çalışmalarına önemli katkılar sunmaktadır.

Bu kapsamda, farklı oksitlerin cam ağ yapısındaki davranışları, ergitme ve viskozite özelliklerine katkıları, termal ve kimyasal dayanım üzerindeki rolleri ile cam uygulamalarındaki işlevleri değerlendirilmektedir. Böylece, borosilikat camların tasarımında oksit bileşiminin neden kritik öneme sahip olduğu ortaya konularak hem araştırmacılara hem de üretim süreçleriyle ilgilenen uzmanlara kapsamlı bir temel sunulması hedeflenmektedir.

2. KULLANILAN DİĞER OKSİTLERİN ETKİSİ

B_2O_3 , tek başına cam fazı oluşturabilen oksitlerden biridir. Bor atomu bu yapıda genellikle üç oksijen atomu ile çevrili olup, oluşan B–O bağlarının bağ enerjisi Si–O bağlarına kıyasla daha düşüktür. Bu durum, bor esaslı camların nispeten yüksek ısı genleşme katsayısına ve düşük mekanik dayanım özelliklerine sahip olmasına neden olmaktadır (Shelby, 2023; Wondraczek ve ark., 2011).

Silika bazlı cam sistemlerinde kullanılan SiO_2 ağ oluşturu yerine B_2O_3 kullanılmasıyla birlikte, bor atomu uygun koşullar altında SiO_4^{4-} tetrahedralarındaki silisyum atomlarının yerini alabilmektedir. Ancak borun tetrahedral koordinasyona geçebilmesi için ilave pozitif yük dengesine ihtiyaç duyulmakta olup, bu gereksinim genellikle Na^+ gibi alkali iyonların sisteme katılmasıyla karşılanmaktadır. Alkali oksit ilavesi, cam ağ yapısında önemli yapısal değişimlere yol açarak ısı genleşme davranışını belirgin şekilde etkilemektedir. Başlangıçta ısı genleşme katsayısında azalma gözlenirken, Na_2O miktarının artmasıyla birlikte Si–O–Si köprü bağlarının kırılması ve köprü oluşturmayan oksijenlerin (NBO) oluşması sonucu bu katsayının yeniden artış gösterdiği bilinmektedir. Şekil 1’ de borosilikat camda ağ oluşturu ve ağ değiştiricinin yapısının şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 1. Borosilikat camda ağ oluşturunucuların ve ağ değiştiricinin yapısının şematik gösterimi (Dores ve ark.; 2019)

Cam ağlarının termodinamik ve mekanik kararlılığı, sisteme katılan oksitlerin ağ oluşturunucu, ara oksit veya ağ değiştirici olarak göstermiş oldukları fonksiyonlara bağlı olarak önemli ölçüde değişiklik gösterir. Örneğin; Al_2O_3 ve ZrO_2 gibi ara oksitler, ağdaki oksijen bağlanma yoğunluğunu artırarak camın sertliğini ve kimyasal dayanımını güçlendirirken; alkali ve toprak alkali oksitler (Na_2O , K_2O , CaO vb.), ağdaki oksijen köprülerinin bir kısmını kırarak ergitme viskozitesini düşürür ve üretim süreçlerinin kontrolünü kolaylaştırır (Simonetti, 2018). Benzer şekilde TiO_2 ve ZnO gibi oksitler, kırılma indisi ve optik bant yapısı üzerinde belirgin modifikasyonlar yaparak borosilikat camların optik performansını optimize eder. Dolayısıyla oksit bileşiminin seçimi, yalnızca camın fiziksel özelliklerini değil, aynı zamanda ergitme, berraklaştırma ve tavlama gibi üretim aşamalarının kinetiğini de doğrudan belirleyen temel bir tasarım değişkenidir. Tablo 1’ de borosilikat camlarda oksitli bileşiklerin özelliklerine etkileri verilmiştir.

Tablo 1. Borosilikat Camlarda Oksitli Bileşiklerin Özelliklerine Etkileri

Oksitli Bileşik	Sınıfı	Yapısal Etki	Termal Özelliklere Etki	Mekanik Özelliklere Etki
SiO ₂	Ağ oluşturunucu	SiO ₄ tetrahedra ile 3D ağına ana omurgasını oluşturur; polimerizasyon derecesini artırır.	Tg'yi yükseltir, termal genleşme katsayısını düşürür; termal şok dayanımını artırır.	Sertliği ve elastisite modülünü artırır; çatlak ilerlemesine direnci yükseltir.
Al ₂ O ₃	Ara oksit	BO ₄ /BO ₃ ve SiO ₄ birimleri arasında çapraz bağlanmayı artırır; ağı sıkılaştırır.	Tg ve viskoziteyi yükseltir; camı termal olarak daha stabil hale getirir.	Sertliği, aşınma direncini ve çatlama dayanımını artırır.
TiO ₂	Ara oksit / kısmen ağ oluşturunucu	Kısmen ağ içerisine katılarak daha kompakt yapı oluşturur; bazı bağ açılarını değiştirir.	Tg'yi ve yüksek sıcaklık viskozitesini artırabilir; ısıl stabiliteyi artırır.	Sertlik ve elastisite modülünde artış; cam daha “sert ve kırılğan” karakter gösterebilir.
ZrO ₂	Ara oksit	Zr–O koordinasyonu ile ağ yoğunluğunu artırır; yapısal kararlılığı güçlendirir.	Termal şok dayanımını ve Tg'yi artırır; yüksek sıcaklık form stabilitesi sağlar.	Sertlikte ve kırılma tokluğunda artış; çatlak ilerleme direncini iyileştirir.
ZnO	Ara/modifiye edici oksit	Zn–O birimleri kısmen ağ yapısına katılabilir, NBO oluşturarak ağı gevşetebilir; bileşime bağlı çift davranış olabilir.	Ergitme sıcaklığını düşürebilir; viskoziteyi belirli aralıkta kontrol etmeye yardımcı olur.	Sertlikte orta düzey artış; bazı sistemlerde kırılma tokluğunu iyileştirebilir.
La ₂ O ₃	Nadir toprak oksidi	La ile O koordinasyonları ağ yoğunluğunu artırır; camı daha “kompakt” hale getirir.	Tg ve cam yoğunluğunu artırır; termal genleşme katsayısını genelde düşürür.	Vickers sertliği, elastisite modülü ve kırılma tokluğunda artış sağlar.
CeO ₂	Nadir toprak / fonksiyonel oksit	Ce ⁴⁺ /Ce ³⁺ redoks çiftleriyle ağ içinde modifikasyon, kusur merkezleri ve renklenme üzerinde etkilidir.	Radyasyon altında yapısal kararlılığı artırabilir; termal özelliklere dolaylı katkı sağlar.	Mekanik kararlılıkta küçük iyileşmeler; daha çok fonksiyonel (UV/radyasyon) etkiler ön planda.
Gd ₂ O ₃	Nadir toprak oksidi	Gd–O bağları ile ağına yoğunluğunu artırır; cam matrisinin kütle yoğunluğunu yükseltir.	Termal özelliklerde (Tg, ısıl iletkenlik) sınırlı değişim; asıl etki radyasyon etkileşimindedir.	Sertlik ve yoğunluk artışı gözlenebilir.
Na ₂ O, K ₂ O, Li ₂ O	Ağ değiştirici /modifiye edici oksit	Si–O–Si ve B–O–B köprülerini kırıp NBO oluşturur; ağı daha gevşek ve daha az polimerize	Tg'yi düşürür, termal genleşme katsayısını artırır; ergitme sıcaklığını düşürerek üretimi	Mekanik dayanım ve kimyasal dayanım genellikle azalır; cam daha kırılğan olabilir.

		hâle getirir.	kolaylaştırır.	
CaO, MgO, BaO, SrO	Toprak alkali ağ değiştirirler	NBO oluşturarak ağı kısmen gevşetir, ancak M^{2+} iyonlarının yükü nedeniyle bazı açılardan ağı yeniden stabilize eder.	Termal genleşme katsayısını kontrol eder; CaO ve MgO kimyasal dayanımı arttırırken BaO yoğunluğu belirgin arttırır.	Sertlik ve aşınma direncini artırabilir; CaO ve MgO genelde mekanik olarak olumlu, BaO daha çok yoğunluk ve optik için etkilidir.
Fe_2O_3 / FeO	Geçiş metali oksit	Ağ içinde modifiye edici veya kısmen yapısal roller; Fe^{3+}/Fe^{2+} oranına bağlı.	Termal iletkenlik ve bazı termal özelliklerde küçük değişimler; esas etki optik ve renklenme.	Mekanik özelliklere sınırlı katkı; bazı bileşimlerde sertlik artışı olabilir.
CuO, CoO, NiO, MnO ₂	Geçiş metali oksitler	Genelde ağ değiştirici /yerel yapısal modifiye edici; M–O koordinasyon birimleri lokal alanlar oluşturur.	Termal özelliklerde küçük değişimler; üretim açısından sınırlı etkiler.	Sertlik ve mikro yapıda küçük farklılıklar oluşturabilir.

Cam esaslı malzemelerin kullanımını sınırlandıran temel faktörlerden biri, yüzey kusurlarına karşı yüksek hassasiyet gösteren gevrek kırılma davranışdır. Cam yüzeyinde doğal olarak veya üretim süreçleri sırasında oluşabilen mikroskobik çatlaklar ve yapısal kusurlar, teorik olarak öngörülen dayanım değerlerinin pratik uygulamalarda elde edilememesine yol açmaktadır. Bu bağlamda, camların mekanik performansının iyileştirilmesine yönelik araştırmalar, yalnızca kimyasal bileşim optimizasyonuna odaklanmakla sınırlı kalmayıp, aynı zamanda mikroyapısal düzen ve yapısal özelliklerin kontrolünü de içeren çok yönlü yaklaşımları kapsamaktadır. Atomik modelleme yöntemleri, cam malzemelerin mekanik özelliklerinin anlaşılmasında önemli bir araç hâline gelmiştir. Bu yaklaşımlar; bağ enerjileri, atomik koordinasyon durumları ve yerel yapısal özelliklerin, elastik özellikler ve kırılma davranışı üzerindeki etkilerini ortaya koymaktadır. Yapısal ve kimyasal heterojenliklerin ise yerel gerilme yoğunlaşmalarına neden olarak çatlak oluşumu ve ilerleme mekanizmalarını etkilediği bilinmektedir.

Cam malzemelerin hasar direncini artırmaya yönelik geliştirilen başlıca güçlendirme yöntemleri arasında termal temperleme, kimyasal temperleme ve bileşimsel modifikasyonlar yer almaktadır. Kimyasal temperleme işlemlerinde cam yüzeyinde oluşturulan basınç gerilmeleri, çatlakların ilerlemesini sınırlandırarak camın pratikte sergilediği mekanik dayanımı önemli ölçüde artırmaktadır. Buna ek olarak, Tablo 2’ de daha önce yapılmış katkılı borosilikat camlara ait önceki bilimsel çalışmaların özeti verilmiştir.

Tablo 2. Katkılı Borosilikat Camlara Ait Önceki Çalışmaların Özeti

Yazar; Yıl	Katkılanan Oksit	Sonuçlar
Bruns ve ark., 2020	Al_2O_3	Al_2O_3 miktarı arttıkça cam ağ yapısında değişim gözlenmiş çatlak direnci ve direnç altında deformasyon toleransı artmış.
Eales ve ark., 2023	Fe_2O_3	Fe_2O_3 miktarı arttıkça bor ile koordinasyonu önemli değişimler göstermemiş.
Arıbuğa ve ark., 2023	$Al_2O_3 + ZrO_2$	ZrO_2 katkılı cam-seramik örneklerde 30 wt.% ZrO_2 ile tam yoğunluk (yaklaşık %100) elde edilmiş; termal iletkenlik, dielektrik sabiti ve termal stabilite bakımından Al_2O_3 ’ye göre daha iyi performans göstermiş.
Usui ve ark., 2018	$TiO_2 + ZnO + Al_2O_3$	Cam-seramikleşme sonrası, optik özelliklerde (ışın kırılması, ışınım yoğunluğu) iyileşme; bu bileşimlerin optik/ fotonik uygulamalar için uygun olduğu rapor edilmiş.
Kullberg ve ark., 2016	ZnO	ZnO oranı değiştirildiğinde camın amorf yapısı korunmuş; yoğunluk ve kırılma indisi artmış. Fakat yüksek ZnO içeren camlarda kristalleşme eğilimi ve ısı iletkenliği/termal kararlılık üzerine dikkat edilmesi gerektiği vurgulanmış.
Ding ve ark., 2023	ZnO	ZnO içeriği arttıkça cam yoğunluğu ve kırılma indeksi artmış; suya dayanıklılık artmış; ancak camın soğutma sırasında kristalleşmeye eğilimi arttığı için bu da işleme ve sabit yapı için dikkat gerektiren bir durum olduğu sonucuna varılmıştır.
Kuluozturk ve ark., 2022	La_2O_3	La_2O_3 oranı artırıldıkça camın yoğunluğu ve gama ışınlarını soğurma kapasitesi artmış, en yüksek radyasyon zırlama performansı %20 La_2O_3 içeren örnekte elde edilmiştir. La_2O_3 katkısı camın şeffaflığını büyük ölçüde korurken zırlama özelliğini belirgin biçimde iyileştirmiştir.

3. SONUÇ

Sonuç olarak, borosilikat camlarda mekanik dayanımın geliştirilmesi, atomik ölçekte yapı-özellik ilişkilerinin kapsamlı biçimde anlaşılmasına dayanmaktadır. Literatürde rapor edilen önceki çalışmalar da, oksit türü ve katkı oranına bağlı olarak cam ağ yapısında meydana gelen değişimlerin mekanik ve termal özellikler üzerinde belirleyici rol oynadığını ortaya koymaktadır. Bileşim tasarımı, topolojik optimizasyon ve uygun güçlendirme tekniklerinin birlikte ele alınması, enerji teknolojileri, optoelektronik uygulamalar ve ileri mühendislik sistemleri için yüksek performanslı cam malzemelerin geliştirilmesine olanak tanımaktadır.

KAYNAKLAR

- Arıbuğa, D., Karaahmet, O., Balcı-Çağiran, Ö., & Çiçek, B. (2023). Effect of Al_2O_3 and ZrO_2 filler material on the microstructural, thermal and dielectric properties of borosilicate glass-ceramics. *Micromachines*, 14(3), 595.
- Bengisu, M. (2016). Borate glasses for scientific and industrial applications: a review. *Journal of materials science*, 51(5), 2199-2242.
- Bruns, S., Uesbeck, T., Weil, D., Möncke, D., Van Wüllen, L., Durst, K., & De Ligny, D. (2020). Influence of Al_2O_3 addition on structure and mechanical properties of borosilicate glasses. *Frontiers in Materials*, 7, 189.
- Ding, X., & Wu, S. (2023). Effect of ZnO content on structure and properties in high refractive index $\text{BaO-ZnO-TiO}_2\text{-SiO}_2$ glass system. *Vibroengineering Procedia*, 50, 152-158.
- Dores, D. R. S., Souza, L. C., Giehl, J. M., Ludwig, V., Silva, V. R., Oliveira, V. H., Costa, R. C., Pacheco, T. S., Rodrigues, C. L. V., Pinotti, C. N., & Costa, Z. M. (2019). Effect of thermal treatment on morphological properties of borosilicate glass doped with silver. In *Anais do X Encontro Científico de Física Aplicada* (pp. 7–10).
- Eales, J. D., Bell, A. M., Cutforth, D. A., Kruger, A., & Bingham, P. A. (2023). Structural changes in borosilicate glasses as a function of Fe_2O_3 content: a multi-technique approach. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 622, 122664.
- Karasu, B., Demirel, İ., Aydın, S., Dalkıran, M., & Lik, B. (2020). Past and present approaches to borosilicate glasses. *El-Cezeri*, 7(2), 940-969.

- Kullberg, A. T. G., Lopes, A. A. S., Veiga, J. P. B., Lima, M. M. R. A., & Monteiro, R. C. (2016). Formation and crystallization of zinc borosilicate glasses: Influence of the ZnO/B₂O₃ ratio. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 441, 79-85.
- Kuluozturk, Z. N., Kurtulus, R., Demir, N., & Kavas, T. (2022). Barium-lead-borosilicate glass containing lanthanum oxide: fabrication, physical properties, and photon shielding characteristics. *Applied Physics A*, 128(2), 166.
- Lian, M., Wang, T., & Wei, C. (2024). Effect of B₂O₃ and basic oxides on network structure and chemical stability of borosilicate glass. *Ceramics*, 7(2), 516-529.
- Polat, S. (2024). Thermal decomposition behaviors, kinetics and thermodynamics of colemanite. *Journal of Boron*, 9(3), 97-103.
- Rodrigues, B. P., To, T., Smedskjaer, M. M., & Wondraczek, L. (2022). Mechanical properties of oxide glasses. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 87(1), 229-281.
- Shelby, J. E. (2023). Properties of potassium niobium germanate glasses. *Physics and Chemistry of Glasses-European Journal of Glass Science and Technology Part B*, 64(3), 69-74.
- Simonetti, G. (2018). Glass ceramics for high-temperature sealing applications: synthesis and physicochemical properties of modified CaO-MgO-Al₂O₃-SiO₂ materials, with a view to recycling of industrial waste.
- Usui, Y., Okada, G., Kawaguchi, N., Masai, H., & Yanagida, T. (2018). Scintillation and optical properties of TiO₂-ZnO-Al₂O₃-B₂O₃ glasses and glass-ceramics. *Japanese Journal of Applied Physics*, 57(4), 046203.

Wondraczek, L., Mauro, J. C., Eckert, J., Kühn, U., Horbach, J.,
Deubener, J., & Rouxel, T. (2011). Towards ultrastrong
glasses.

YAPAY ZEKA DESTEKLİ HASSAS TARIM DERİN ÖĞRENME İLE YABANI OT TESPİTİNDE YENİ NESİL ÇÖZÜMLER

Ayşe ÇELİK¹

1. GİRİŞ

Tarım, insanlığın var oluşundan bu yana yaşamsal öneme sahip bir faaliyet olmuş ve modern toplumların gıda güvenliğinin temel direği olmaya devam etmektedir. Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Örgütü verilerine göre dünya nüfusunun 2050 yılına kadar 9.7 milyara ulaşması beklenmekte ve bu demografik artış küresel gıda üretiminde %70'lik bir artış gerekliliğini ortaya koymaktadır (Goyal, Nath, Niranjan, & Niyogi, 2025). Ancak bu artan gıda talebini karşılama sürecinde tarımsal üretkenlik birçok biyotik ve abiyotik stres faktörünün etkisi altında ciddi tehditlerle karşı karşıyadır. Bu faktörler arasında yabancı ot istilası tarımsal verimi düşüren en kritik ve ekonomik açıdan en maliyetli sorunlardan biri olarak öne çıkmaktadır. Yabancı otlar tarımsal ekosistemde istenmeyen yerlerde büyüyen ve kültür bitkileriyle su, ışık, besin maddeleri ve fiziksel alan açısından yoğun bir rekabete girerek ürün verimini dramatik şekilde azaltan bitki türleridir (Gattal, Nait-Hamoud, Gattal, Hadji, & Cheriet, 2025).

Yabancı otların tarımsal sistemler üzerindeki etkisi çok boyutludur. Hasat kalitesinin düşmesi, tarımsal işlem maliyetlerinin artması, hastalık ve zararlıların barınma alanlarının oluşması gibi faktörler bu etkilerin başlıcalarıdır. Ekonomik kayıplar küresel ölçekte oldukça ciddidir. Hiçbir kontrol önlemi

¹ Öğr. Gör., Gümüşhane Üniversitesi, Kelkit Aydın Doğan Meslek Yüksekokulu, Mimarlık ve Şehir Planlama, ORCID: 0000-0003-1495-297X.

alınmadığı takdirde yabancı otların neden olduğu potansiyel ürün kayıpları buğday için %50, mısır için %40 ve patates için %44 seviyelerine ulaşabilmektedir. Yıllık yabancı ot kontrol maliyetleri ve verim kayıplarının toplamı ABD'de 33 milyar doları aşarken, Avrupa Birliği ülkelerinde bu yönetim maliyeti yıllık 8 milyar Euro civarındadır. Bu rakamlar etkili ve sürdürülebilir yönetim stratejilerinin geliştirilmesinin ne kadar kritik olduğunu açıkça ortaya koymaktadır (Mexicano, Carmona, Cervantes, Bee, & Montes, 2025).

Tarım tarihinde yabancı ot kontrolü temelde mekanik, kimyasal, biyolojik ve kültürel kontrol yöntemleri olmak üzere dört ana kategoriye ayrılmıştır. Mekanik kontrol en eski yöntem olup yabancı otların fiziksel olarak uzaklaştırılması prensibine dayanır. Ancak manuel çapalama gibi işlemler son derece emek yoğunudur ve büyük tarım alanlarında ekonomik olarak sürdürülebilir değildir. Bir hektar buğday tarlasında manuel temizlik için yaklaşık 200-300 saat insan gücü gerekmektedir. Kimyasal kontrol ise 20. yüzyılın ortalarından itibaren dominant strateji haline gelmiştir. Herbisitlerin etkinliği yüksek olsa da toprak ve su kaynaklarının kontaminasyonu, biyolojik çeşitliliğin azalması ve giderek büyüyen herbisit direnci gibi ciddi çevresel ve sağlık riskleri bulunmaktadır (Ramalakshmi, Karmakar, Bajaj, Abhimanyu, & Srinivasa, 2025).

21. yüzyılın başından itibaren tarım sektörü geleneksel uygulamalardan veri odaklı ve alan-spesifik yönetim stratejilerine dayanan "Hassas Tarım" yaklaşımına geçiş yapmıştır. Hassas tarım GIS, GPS, uzaktan algılama, İnsansız Hava Aracı (İHA) ve yapay zeka algoritmalarının entegre kullanımıyla karakterize edilir. Yabancı ot yönetimi bağlamında bu teknoloji doğru zamanda, doğru yerde ve doğru miktarda prensibiyle sadece yabancı ot tespit edilen spesifik alanlara hedefli ilaçlama yapılmasını sağlar. Saha çalışmaları bu yaklaşımın herbisit kullanımını %30-90 arasında azaltarak hem ekonomik tasarruf

sağladığını hem de çevresel sürdürülebilirliğe katkı sunduğunu göstermektedir. Ancak bu sistemin başarısı yabancı otların gerçek zamanlı ve yüksek doğrulukla otomatik olarak tespiti edilmesine bağlıdır (Gupta, Agarwal, Garg, & Pandey, 2025).

Yapay zeka ve özellikle derin öğrenme alanındaki gelişmeler bilgisayarlı görü aracılığıyla makinelerle görsel dünyayı anlama yeteneği kazandırmıştır. AlexNet'in elde ettiği başarı derin öğrenme çağına başlangıcı kabul edilmektedir. Derin öğrenme modelleri, ham görüntülerden otomatik olarak hiyerarşik özellik temsillerini öğrenebilmekte ve bu görüntü sınıflandırma ve nesne tespiti gibi karmaşık görevlerde son derece başarılı olmaktadır. Yabancı ot tespiti özelinde bu modeller yüksek doğrulukla GPU altyapısı sayesinde gerçek zamanlı işlem kapasitesi ve transfer öğrenme teknikleriyle sınırlı veride bile güçlü genelleme yeteneği sunmaktadır (Gupta et al., 2025).

Derin öğrenme tabanlı yabancı ot tespiti alanındaki öncü çalışmalar farklı metodolojileri temsil etmektedir. Gupta ve arkadaşları (2025), transfer öğrenme kullanarak bitki sınıflarının ayrıştırılmasında %90 doğruluğa ulaşılar (Gupta et al., 2025). Mexicano ve arkadaşları (2024), multispektral görüntüleme ve vejetasyon indeksleriyle spektral bilginin katkısını göstermiştir (Mexicano et al., 2025). Nesne tespiti alanında Goyal ve arkadaşları (2025), İHA tabanlı YOLO modellerinin potansiyelini vurgulamıştır (Goyal et al., 2025). Gattal ve arkadaşları (2025) ise YOLOv8 ile %98 gibi etkileyici bir doğruluk elde etmiştir (Gattal et al., 2025). Ramalakshmi ve arkadaşları (2025) ise kenar bilişim cihazlarında hafif derin öğrenme modellerinin kullanımını ve hiyerarşik sınıflandırmanın etkinliğini kanıtlamıştır (Ramalakshmi et al., 2025). Bu bölüm, söz konusu teknolojilerin kapsamlı bir incelemesini sunarak farklı model mimarileri, veri setleri ve uygulama senaryolarını sistematik bir şekilde ele almayı amaçlamaktadır.

2. YABANI OT TESPİTİNDE DERİN ÖĞRENME MODELLERİ

Derin öğrenme modelleri tarımsal otomasyonda ve hassas tarım uygulamalarında temel olarak görüntü sınıflandırması ve nesne tespiti olmak üzere iki ana metodoloji üzerinden kurgulanmaktadır. Görüntü sınıflandırması bir görselin bütünsel olarak belirli bir kategoriye ait olup olmadığını belirlerken nesne tespiti, görsel içerisindeki yabancı otların hem türünü tanımlamakta hem de koordinat bazlı konumlarını belirlemektedir. Bu bölümde yabancı ot tespitinde devrim yaratan Konvolüsyonel Sinir Ağları gerçek zamanlı tespitin öncüsü YOLO ailesi ve çok ölçekli özellik çıkarımında uzmanlaşan Inception mimarileri detaylı olarak ele alınacaktır (Goyal et al., 2025).

2.1. Konvolüsyonel Sinir Ağları (CNN)

CNN mimarileri, görüntü verilerindeki mekânsal hiyerarşiyi otomatik olarak öğrenebilen çok katmanlı yapay sinir ağlarıdır. Geleneksel makine öğrenmesinin aksine özellik çıkarımı süreçlerini manuel tasarımdan kurtararak ham piksellerden doğrudan öğrenme gerçekleştirirler. Bir CNN modeli temel olarak konvolüsyon katmanları, havuzlama katmanları ve sınıflandırmanın yapıldığı tam bağlı katmanlardan oluşur (Kholiya, Mishra, Pandey, & Tripathi, 2023).

Konvolüsyon katmanında belirli çekirdekler görüntü üzerinde gezdirilerek kenarlar, dokular ve renk geçişleri gibi düşük seviyeli özellikler haritalandırılır. Katmanlar derinleştikçe model daha karmaşık şekilleri ve nesne parçalarını tanımaya başlar. ReLU aktivasyon fonksiyonu kullanılarak ağa doğrusal olmayan özellikler katılırken hesaplama verimliliği artırılır ve gradyan kaybı problemi minimize edilir. Havuzlama katmanları ise özellik haritalarının boyutunu küçültürken hesaplama yükünü

azaltır ve modeli küçük konumsal değişikliklere karşı dirençli hale getirir (Lakshmi Narayana & Venkata Ramana, 2023).

2.2. YOLO (You Only Look Once) Modelleri

YOLO nesne tespitini bir regresyon problemi olarak ele alan ve görüntüyü tek bir geçişte analiz eden devrim niteliğinde bir mimaridir. Geleneksel iki aşamalı modellerin aksine YOLO görüntüyü bir ızgaraya böler ve her hücre için aynı anda nesne olasılığını ve sınır kutularını tahmin eder. Bu hız avantajı saniyede 45-66 kare işleme kapasitesi sunarak otonom tarım robotları ve İHA'lar için gerçek zamanlı yabancı ot tespitini mümkün kılmaktadır.

YOLOv8 2023 yılında piyasaya sürülmüş olup sabit kutu gerektirmeyen tespiti ve ayrıştırılmış başlık yapısıyla performansı optimize etmiştir. Gattal ve arkadaşlarının (2025) çalışmasında YOLOv8, %98,0 doğruluk ve %95,2 duyarlılık gibi etkileyici sonuçlar elde ederek karmaşık tarla koşullarında bile mükemmel tespit gücü sergilemiştir (Gattal et al., 2025). Goyal ve arkadaşları (2025) ise patates tarlalarında YOLOv8 ve YOLOv9'u karşılaştırmış YOLOv8'in %97,6 gibi yüksek bir kesinlik sunduğunu belirlemiştir (Goyal et al., 2025).

2.3. InceptionV3 ve Çok Ölçekli Özellik Çıkarımı

InceptionV3 görsel dünyadaki nesnelerin farklı boyutlarda ve ölçeklerde olabileceği gerçeğinden yola çıkarak tasarlanmıştır. Mimari, aynı katman içerisinde 1x1, 3x3 ve 5x5 boyutundaki filtreleri paralel olarak kullanarak hem yerel ince detayları hem de global yapısal özellikleri eşzamanlı olarak yakalar. Bu tasarım özellikle büyüme aşamalarına göre fiziksel boyutları büyük farklılık gösteren yabancı otların tanımlanmasında stratejik bir avantaj sunar.

Modelin geliştirilmiş versiyonları, hesaplama maliyetini düşürmek için $n \times n$ boyutundaki konvolüsyonları $1 \times n$ ve $n \times 1$

şeklinde ayrıştıran teknikler kullanır. Gattal (2025), tarafından yapılan testlerde InceptionV3 %90,5 doğruluk oranı elde etmiştir. Her ne kadar YOLOv8'in genel doğruluğunun gerisinde kalsa da InceptionV3'ün tür seviyesi sınıflandırmadaki başarısı ve 2-9 yapraklı genç bitkilerin ayırt edilmesindeki hassas özellik temsil yeteneği onu değerli bir alternatif kılmaktadır (Gattal et al., 2025).

2.4. Mimarilerin Karşılaştırmalı Analizi ve Uygulama Seçimi

Yabani ot tespiti projelerinde model seçimi, doğrudan uygulama senaryosuna ve donanım kısıtlarına bağlıdır. YOLO ailesi konum tespiti gerektiren yüksek hıza ihtiyaç duyan ve İHA bazlı geniş alan taraması yapılan senaryolar için en güçlü adaydır. Bu modeller saniyeler içinde binlerce bitkiyi haritalandırabilir ve anında müdahale sistemlerini tetikleyebilir.

InceptionV3 ve geleneksel CNN yapıları ise konum bilgisinden ziyade tür tayininin kritik olduğu statik görüntü analizi ve bitki biyolojisi araştırmaları için daha uygundur. Sınırlı veri setlerinde transfer öğrenme ile hızlı prototipleme yapmak isteyen araştırmacılar için GoogLeNet gibi hafif ve stabil mimariler avantajlıdır. Kaynak kısıtlı kenar cihazlarda ise MobileNet gibi optimize edilmiş hafif varyantlar hızı ve verimliliği dengelemektedir (Mehta & Rastegari, 2021). Sonuç olarak yüksek doğruluk ve gerçek zamanlılık hedefleyen modern tarım sistemlerinde YOLO türevleri şu anki teknolojinin zirvesini temsil etmektedir.

3. VERİ SETLERİ VE ÖN İŞLEME TEKNİKLERİ

Derin öğrenme modellerinin başarısı, kullanılan eğitim verilerinin kalitesine, çeşitliliğine ve temsiliyetine kritik derecede bağlıdır. Makine öğrenmesinin temel prensibi düşük kaliteli veya

yanlı veri ile eğitilen modellerin mimari açıdan ne kadar sofistike olursa olsun zayıf performans sergileyeceğini vurgular. Yabani ot tespiti gibi karmaşık görsel tanıma görevlerinde veri seti tasarımı ve ön işleme stratejileri model performansını doğrudan etkileyen unsurlardır. Bu bölümde yabani ot tespitinde kullanılan veri setlerinin karakteristikleri, toplama metodolojileri, görüntü ön işleme teknikleri ve yapay veri artırma stratejileri derinlemesine incelenecektir.

3.1. Yabani Ot Tespiti Veri Setlerinin Karakteristikleri

Yabani ot tespiti için kullanılan veri setleri farklı kaynaklardan, çeşitli sensör modalitelerinden ve farklı tarımsal ekosistemlerden elde edilmektedir. Gupta ve arkadaşlarının (2025) çalışmasında kullanılan veri seti Kaggle platformundan sağlanmış olup 12 yabani ot ve 4 ekin türünü içeren toplam 6.268 bitki görüntüsünden oluşmaktadır (Gupta et al., 2025). Ancak bu veri seti, bazı sınıfların 200'den fazla, bazılarının ise sadece 50-100 örnek içermesi nedeniyle ciddi bir sınıf dengesizliği sorunu barındırmaktadır. Görüntüler kontrollü sera ortamlarında çekildiği için gerçek tarla koşullarının tüm zorluklarını tam olarak yansıtmamaktadır.

Daha ileri düzey bir veri toplama yöntemi Mexicano ve arkadaşları (2024) tarafından uygulanmıştır (Mexicano et al., 2025). Ayçiçeği tarlarından İHA kullanılarak 30 metre yükseklikten toplanan multispektral görüntüler Mavi, Yeşil, Kırmızı, Kırmızı Kenar ve Yakın Kızılötesi (NIR) olmak üzere 5 farklı spektral bant içermektedir. Bu veri setinde 1.500 adet ilgi bölgesi çıkarılmış ve arka plan, yabani ot ve ayçiçeği sınıfları arasında tam bir denge sağlanmıştır. NIR bandının varlığı sağlıklı bitkilerin bu bölgede yüksek yansıtma göstermesi nedeniyle yabani ot ve ekin ayrımında RGB görüntülere göre büyük avantaj sağlamaktadır (Celik, Balik Sanli, & Bozic, 2024).

3.2. Görüntü Ön İşleme Teknikleri ve Dönüşümleri

Görüntü ön işleme ham verilerin modellere beslenmeden önce optimize edilmesi sürecidir. Bu teknikler görüntü kalitesini artırırken hesaplama maliyetini azaltmayı amaçlar. Yeniden boyutlandırma bu sürecin temel adımıdır. MobileNetV2 224×224, YOLO modelleri ise genellikle 640×640 boyutunda girdi bekler.

Binary maskeleme ve ilgi bölgesi çıkarımı arka plan karmaşıklığını azaltarak modelin sadece hedef nesneye odaklanmasını sağlar. Bu süreçte RGB görüntüler HSV renk uzayına dönüştürülür ve renk bilgisini aydınlatma değişkenliğinden ayrıştırarak bitki segmentasyonunda daha yüksek başarı sergiler. Yeşil bitki materyalini ayırmak için uygulanan eşik değer ve morfolojik işlemler sonucunda arka planı tamamen siyah olan ve sadece bitki piksellerini içeren temiz görüntüler elde edilir. Ramalakshmi'nin çalışmasında bu teknik MobileNetV2'nin doğruluğunu %0,39 oranında artırmıştır (Sandler, Howard, Zhu, Zhmoginov, & Chen, 2018).

3.3. Veri Artırımı Yapay Veri Çeşitliliği Yaratma

Veri artırma, mevcut eğitim örneklerine çeşitli dönüşümler uygulayarak yapay yeni örnekler oluşturma tekniğidir ve temel amacı aşırı öğrenmeyi önleyerek modelin genelleme yeteneğini artırmaktır. Yatay ve dikey çevirme, rastgele döndürme, kırpma, öteleme ve kayma gibi geometrik dönüşümler farklı kamera açılarını, perspektif değişikliklerini ve İHA uçuş yönü varyasyonlarını simüle eder.

Fotometrik dönüşümler ise aydınlatma koşulları ve kamera ayarlarındaki farklılıkları simüle eder. Parlaklık ve kontrast ayarlamaları, renk, gama düzeltmesi ve Gauss bulanıklaştırma gibi teknikler modelin günün farklı saatlerindeki ışık değişimlerine ve sensör gürültülerine karşı dayanıklı hale gelmesini sağlar (Jackson, Atapour-Abarghouei, Bonner,

Breckon, & Obara, 2018). Modern nesne tespit modellerinde kullanılan Mozaik veri artırma dört farklı eğitim görüntüsünü 2×2 bir gridde birleştirerek özellikle küçük nesne tespitini iyileştirir ve batch normalization istatistiklerini zenginleştirir. CutMix tekniği ise iki görüntüyü karıştırarak modeli kapatma durumlarına karşı eğitir (Yun et al., 2019).

4. GERÇEK ZAMANLI UYGULAMALAR: KENAR BİLİŞİM VE İHA ENTEGRASYONU

Derin öğrenme modellerinin laboratuvar ortamında elde ettiği yüksek doğruluk oranlarının gerçek tarımsal üretimde pratik bir değere dönüşebilmesi için gerçek zamanlı işlem kapasitesi ve tarla koşullarında operasyonel etkinlik kritik öneme sahiptir. Modern hassas tarım sistemler yabancı otları anında tespit edip müdahale edebilmek amacıyla saniyede onlarca kare görüntü işleyebilen düşük gecikmeli ve enerji verimli sistemlere ihtiyaç duymaktadır. Bu bağlamda derin öğrenme modellerinin sahada kullanımı için kenar bilişim ve İHA entegrasyonu iki temel paradigma olarak öne çıkmaktadır (Louargant et al., 2017).

4.1. Gerçek Zamanlı Yabancı Ot Tespitinde Sistem Gereksinimleri ve Donanım

Gerçek zamanlı bir sistem veriyi aldığı andan itibaren belirli bir zaman kısıtı içerisinde çıktı üretmeyi garanti etmelidir. Yabancı ot tespiti uygulamalarında bu kısıtlar uygulama senaryosuna göre ciddi farklılıklar gösterir. Örneğin 1 m/s hızla hareket eden otonom bir robotun yabancı otu 10 cm önceden tespit edebilmesi için tüm işlem döngüsünün 100 ms içerisinde tamamlanması gerekir ki bu da görüntü işlemeye yaklaşık 30-50 ms süre bırakır. İHA tabanlı geniş alan taramalarında ise saniyede 15-30 kare işleme hızı veri toplama verimliliği için hedeflenir. En gevşek gereksinim olan traktör monteli sistemlerde ise nozzle

aktivasyonu için 200-500 ms'lik bir işlem süresi yeterli olabilmektedir (Rasmussen et al., 2019).

Bu gereksinimleri karşılamak için NVIDIA Jetson serisi gibi yüksek performanslı gömülü GPU'lar veya Google Coral Edge TPU gibi ultra düşük güç tüketen mikrodenetleyiciler kullanılır. Büyük derin öğrenme modellerinin bu kısıtlı donanımlarda çalışabilmesi için model optimizasyon teknikleri hayati önem taşır.

4.2. Kenar Bilişim: Tarımsal Uygulamalarda Dağıtık Zeka

Kenar bilişim, veri işlemenin merkezi bulut sunucularından alınarak sensör ve IoT cihazları gibi ağın uç noktalarına kaydırılmasıdır. Tarımda bu yaklaşım verinin yerel cihazda işlenmesi sayesinde ağ gecikmesini ortadan kaldırarak toplam gecikmeyi 150-700 ms seviyelerinden 15-50 ms seviyelerine indirir. Ayrıca yüksek çözünürlüklü görüntülerin buluta gönderilmesi yerine sadece tespit sonuçlarının iletilmesi bant genişliği kullanımını 1000 kat azaltarak kırsal alanlardaki bağlantı sorunlarına çözüm sunar. Kenar bilişim aynı zamanda veri gizliliğini korur ve ağ bağlantısı olmasa dahi offline çalışabilirlik sağlar (Ramalakshmi et al., 2025).

4.3. İnsansız Hava Araçları ile Geniş Alan İzleme

İHA'lar, geniş tarım alanlarını hızla tarayabilme ve yüksek uzamsal çözünürlük 1-3 cm/piksel sunabilme yetenekleriyle tarımsal izlemede devrim yaratmıştır. Tek bir uçuşta 10-50 hektarlık alanı 20-40 dakikada tarayabilen bu araçlar, yer tabanlı sistemlere göre 10-20 kat daha hızlı kapsama alanı sağlar. İHA'lar ayrıca multispektral ve termal sensörlerin entegrasyonu ile çok modlu veri füzyonuna imkan tanıyarak tespit doğruluğunu artırır (Ramalakshmi et al., 2025).

4.4. Pratik Zorluklar ve Gelecek Perspektifleri

Gerçek zamanlı sistemlerin sahadaki başarısının önünde değişken aydınlatma, bitki yoğunluğuna bağlı örtülme GPS hassasiyeti ve sınırlı pil ömrü gibi ciddi engeller bulunmaktadır. Aydınlatma sorunları için ön işleme teknikleri ve multispektral görüntüleme önerilirken konumlandırma hataları için RTK-GPS teknolojisi ± 2 cm doğruluk sağlamaktadır. Enerji yönetimi için ise model optimizasyonu ve dinamik model seçimi stratejileri uygulanmaktadır.

Gelecekte, 5G ağlarının düşük gecikme avantajıyla hibrit bulut-kenar mimarilerinin yaygınlaşması özel AI hızlandırıcı gömülü sistemlere entegre olması ve çoklu robotların koordineli çalıştığı robotik yaklaşımları yabancı ot tespiti daha ileri bir noktaya taşıyacaktır. Ayrıca RGB verilerin multispektral, termal ve LiDAR verileriyle birleştirildiği çok modlu füzyon yaklaşımları ve yeni türleri az veriyle tanıyabilen teknikleri sahada operasyonel etkinliği maksimize edecektir.

5. VEJETATİF İNDEKSLER VE MULTİSPEKTRAL GÖRÜNTÜLEMENİN ROLÜ

Geleneksel tarımsal izleme yöntemlerinde yaygın olarak kullanılan RGB (Kırmızı-Yeşil-Mavi) görüntüleme teknolojisi insan gözünün algılayabildiği görünür spektrum (400-700 nm) ile sınırlıdır. Ancak bitkiler elektromanyetik spektrumun çok daha geniş bir aralığında, özellikle yakın-kızılötesi (NIR) bölgesinde (700-1100 nm) hayati öneme sahip spektral imzalar sergilerler (Li, Zhang, Qian, Zhu, & Shen, 2015). Bu imzalar bitki sağlığı, klorofil içeriği, su stres durumu ve türe özgü biyokimyasal özellikler hakkında RGB verilerinin sunamadığı derinlemesine bilgiler içerir. Multispektral görüntüleme teknolojileri bu ek bantları yakalayarak bitki karakterizasyonunu bilimsel bir temele

oturtur. Vejetatif indeksler ise bu bantların matematiksel kombinasyonları yoluyla bitki özelliklerini nicelleştiren en güçlü araçlardır.

5.1. Bitki Spektral İmzaları ve Multispektral Sensör Teknolojileri

Bitkilerin spektral davranışı yaprak yapısı, pigmentasyon ve fizyolojik durumla doğrudan ilişkilidir. Sağlıklı bir bitki yaprağı, görünür spektrumda (400-700 nm) klorofil absorpsiyonu nedeniyle mavi ve kırmızı ışığı emerken yeşil ışığı yansıttığı için gözümüze yeşil görünür. Ancak asıl ayırt edici değişim "Kırmızı Kenar" bölgesinde başlar ve burada yansımada aniden %5'ten %50'ye fırlar (Zu, Yang, Wang, Cai, & Yang, 2024). Yakın-kızılötesi (NIR) bölgesinde ise yaprak iç yapısındaki hava boşlukları ışığı dağıtır ve %40-60 oranında yüksek bir yansımaya oluşturur. Farklı bitki türleri pigment yoğunlukları ve yaprak dokuları nedeniyle bu bölgelerde kendilerine özgü spektral imzalar bırakırlar.

İHA üzerine monte edilen bu sensörler 30 metre yükseklikten 1,5 cm/piksel gibi yüksek bir uzamsal çözünürlük sağlayarak her bir bitkinin radyometrik verisini toplar. Bu sistemlerde bulunan sensörler ortamdaki ışık değişimlerini ölçerek görüntülerin radyometrik kalibrasyonunu yapar ve böylece farklı gün ve saatlerde toplanan veriler birbiriyle bilimsel olarak karşılaştırılabilir hale gelir.

5.2. Vejetatif İndeksler: Bitki Özelliklerinin Nicelleştirilmesi

Vejetatif indeksler bitki örtüsünün yoğunluğunu ve sağlığını ölçmek için kullanılan standartlaştırılmış formüllerdir. Bunlar arasında en bilineni NDVI (Normalize Edilmiş Fark Vejetasyon İndeksi) olup formülüyle hesaplanır. Sağlıklı bitkiler kırmızı ışığı emip NIR'ı güçlü yansıttığı için yüksek NDVI değerleri (0.8 - 1.0) alırken, yabani otlar ve toprak daha düşük

değerler sergiler. Ancak NDVI, toprak arka plan etkisine ve yüksek bitki yoğunluğundaki doygunluk problemine karşı hassastır. Bu sınırlamaları aşmak için geliştirilen OSAVI (Optimize Edilmiş Toprak Düzeltmeli VI), toprak arka plan gürültüsünü minimize ederken, SIPI (Yapı Bağımsız Pigment İndeksi) klorofil-karotenoid oranını ölçerek bitkideki yapısal değişimlerden bağımsız olarak stres durumunu tespit eder.

Her bir indeks bitkinin farklı bir fizyolojik yönünü vurgular. Örneğin NDRE, klorofil içeriğine NDVI'dan daha hassastır ve bitki gelişiminin ileri aşamalarında daha doğru sonuçlar verir. Bu zengin indeks seti ekin ve yabancı ot arasındaki spektral benzerliklerin bulunduğu bölgelerini aşmak için gerekli olan çok boyutlu veriyi sağlar.

5.3. Pratik Değerlendirme ve Gelecek Perspektifleri

Multispektral görüntüleme yaklaşımının en büyük avantajı, derin öğrenme modelleri gibi binlerce görüntüye ihtiyaç duymadan, sadece 25-30 görüntü ile oldukça başarılı sonuçlar verebilmesidir. Ayrıca vejetatif indekslerin biyolojik karşılıkları olduğu için elde edilen sonuçlar uzmanlar için şeffaf ve yorumlanabilir. Ancak yüksek donanım maliyeti ve karmaşık radyometrik kalibrasyon süreçleri bu teknolojinin küçük çiftçiler tarafından benimsenmesini zorlaştıran temel engellerdir.

Gelecekte yabancı ot tespiti sistemleri multispektral zenginlik ile derin öğrenmenin otomatik özellik öğrenme gücünü birleştiren hibrit yapılara doğru evrilecektir. RGB kameraların sunduğu mekânsal detaylar ile multispektral sensörlerin sunduğu fizyolojik verilerin füzyonu sahadaki tespit doğruluğunu maksimize edecektir. Özellikle erken stres tespiti gibi senaryolarda multispektral veriler, yabancı otların ekin üzerindeki rekabet baskısını henüz gözle görülür bir hasar oluşmadan yakalama potansiyeli taşımaktadır. Sonuç olarak multispektral görüntüleme sadece yabancı otu bulmakla kalmayıp tarladaki

biyolojik etkileşimleri anlamamızı sağlayan stratejik bir teknoloji olarak hassas tarımın merkezinde yer almaktadır.

6. PERFORMANS METRİKLERİ VE KARŞILAŞTIRMALI MODEL ANALİZİ

Yabani ot tespiti sistemlerinin etkinliği laboratuvar sonuçlarının sahada ne ölçüde karşılık bulacağını anlamak için çeşitli performans metrikleriyle nicelleştirilmelidir. Model seçimi süreci sadece genel doğruluk oranlarına bakılarak değil belirli bir uygulama senaryosunun gereksinimlerini karşılayan metriklerin kapsamlı analiziyle yürütülmelidir. Özellikle sınıf dengesizliği olan tarımsal veri setlerinde doğruluk metriği tek başına yanıltıcı olabildiğinden, kesinlik, duyarlılık ve F1 skoru gibi dengeli ölçütler devreye girer. Bu bölümde AlexNet'ten YOLOv9'a kadar geniş bir model yelpazesinin performans metrikleri üzerinden derinlemesine bir karşılaştırması sunulacaktır.

6.1. Sınıflandırma Görevlerinde Temel Performans Metrikleri

Sınıflandırma modellerinin performans değerlendirmesi, tahminlerin gerçek etiketlerle ne kadar iyi örtüştüğünü ölçen Karışıklık Matrisi üzerine inşa edilir. Yabani ot tespiti bağlamında Doğru Pozitif (TP), yabani otun başarıyla tanınmasını, Yanlış Negatif (FN) ise bir yabani otun ekin sanılarak kaçırılmasını temsil eder ki bu, tarlada tohum dökülmesine yol açtığı için en kritik hatadır. Yanlış Pozitif (FP) ise ekinin yabani ot sanılarak ilaçlanması anlamına gelir ve bu da gereksiz kimyasal kullanımına dolayısıyla ekonomik ve çevresel maliyete yol açar (Gupta et al., 2025).

Bu temel değerlerden türetilen Kesinlik, yabani ot denilen örneklerin ne kadarının gerçekten ot olduğunu ölçerek yanlış ilaçlamayı önlemeye odaklanır. Duyarlılık ise tarladaki yabani

otların yüzde kaçının yakalandığını gösterir. İdeal bir sistemde her iki değerin de yüksek olması istenirki ancak pratikte bir denge kurulması gerekir. F1-Skoru bu iki değerin harmonik ortalamasını alarak modelin genel başarısını tek bir rakamla özetler.

6.2. Uygulama Senaryolarına Göre Model Seçim Stratejisi

Hassas tarım uygulamalarında tek bir en iyi model yoktur. Seçim senaryonun önceliklerine göre yapılmalıdır. Eğer hedef organik tarım gibi sıfır hata ve minimum kimyasal kullanımı %98,6 kesinlik sunan YOLOv7 veya YOLOv8 tercih edilmelidir. Ancak herbisit direnci gelişmiş ve tek bir kök dahi kalmaması gereken bir tarlada çalışılıyorsa %98,8 duyarlılık sunan modeller ön plana çıkar (Gattal et al., 2025).

Sınırlı veriye sahip yeni bir türle çalışılıyorsa InceptionV3 veya MobileNetV2 gibi modellerin transfer öğrenme kapasitesinden yararlanılmalı veya multispektral indeksler üzerinden SVM tabanlı bir yapı kurulmalıdır. Sonuç olarak YOLO ailesi (v7 ve v8) bugün yabancı ot tespitinde hız ve doğruluk dengesi bakımından standart kabul edilmektedir. MobileNetV2 ise kısıtlı donanımlarda sunduğu şaşırtıcı performansla kenar bilişim dünyasının en güçlü oyuncusu olduğunu kanıtlamıştır. Bu metrik tabanlı yaklaşımlar tarımda dijitalleşmenin sadece bir teknoloji kullanımı değil aynı zamanda veriye dayalı bir optimizasyon süreci olduğunu göstermektedir.

7. MODEL AVANTAJLARI, ZORLUKLAR VE PRATİK UYGULAMALAR

Derin öğrenme tabanlı yabancı ot tespiti alanındaki öncü çalışmaların karşılaştırmalı analizi tarımsal otomasyonda yeni bir dönemin kapılarını aralamaktadır. Ancak laboratuvar ortamında

elde edilen %98'lik doğruluk oranlarının sahada sürdürülebilir bir başarıya dönüşmesi için modellerin güçlü yönleri, teknik sınırlamalar ve operasyonel gerçekliklerin bütüncül bir bakış açısıyla değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu bölümde CNN transfer öğrenmeden YOLO mimarilerine, hafif modellerden multispektral yaklaşımlara kadar tüm stratejiler ekonomik, çevresel ve teknik boyutlarıyla tartışılmaktadır.

7.1. Derin Öğrenme Yaklaşımlarının Stratejik Analizi

Yabani ot tespitinde kullanılan temel paradigmlar farklı uygulama ihtiyaçlarına göre optimize edilmiştir. CNN tabanlı transfer öğrenme yaklaşımı, özellikle sınırlı veriye sahip araştırmacılar için düşük hesaplama maliyeti ve uygulama basitliği sunar. ImageNet gibi devasa veri setlerinde eğitilmiş modellerin bilgisi, yabani ot tespiti gibi spesifik görevlere aktarılabilir. Ancak bu modellerin en büyük kısıtı, nesne konumlandırması yapamamalarıdır. Herbisit ilaçlama memelerinin veya robotik kolların tam olarak nereye müdahale edeceği bilgisini sağlamaz. Bu nedenle CNN sınıflandırıcılar daha çok tarlanın genel yabani ot yoğunluk haritalarının çıkarılmasında veya hızlı prototipleme çalışmalarında tercih edilmektedir.

YOLO mimarisi tek bir sinir ağı geçişinde hem yabani otun türünü hem de koordinatlarını belirleyebilmesi onu gerçek zamanlı otonom robotlar için vazgeçilmez kılar. YOLOv8 ve v9 gibi modern versiyonlar saniyede 60 karenin üzerindeki hızlarıyla otonom sistemlerde kesintisiz bir tespit-müdahale döngüsü sağlar. Ancak bu başarının bedeli binlerce görüntünün manuel olarak etiketlenmesi gerekliliğidir.

Öte yandan MobileNetV2 gibi hafif modeller kenar bilişim paradigmasının en güçlü temsilcileridir (Sandler et al., 2018). Sadece 3.4 milyon parametre ile elde edilen %98,90'lık

doğruluk oranı büyük modellerin her zaman daha iyi olduğu algısını yıkmıştır. Bu modeller kısıtlı pil ömrüne sahip İHA'lar veya düşük maliyetli Jetson Nano gibi donanımlarda yüksek verimlilikle çalışarak verinin buluta gönderilmeden yerinde işlenmesini sağlar. Bu durum sadece bant genişliği tasarrufu sağlamakla kalmaz aynı zamanda çiftlik verilerinin gizliliğini de yerel cihazda korur. Hiyerarşik sınıflandırma ise morfolojik olarak birbirine aşırı benzeyen türlerin ayrıştırılmasında böl ve yönet stratejisiyle hata oranlarını minimize ederek biyolojik benzerliklerin yarattığı teknik engelleri aşmaktadır.

7.2. Saha Uygulamalarında Teknik ve Operasyonel Zorluklar

Gerçek zamanlı yabancı ot tespiti sistemlerinin önündeki en büyük engel değişken çevre koşullarıdır. Sabahın erken saatlerindeki düşük ışık öğle güneşinin yarattığı sert gölgeler veya yağmur sonrası yapraklardaki parlamalar laboratuvar verileriyle eğitilen modellerin performansını ciddi şekilde düşürebilir. Bu veri problemini aşmak için modellerin agresif veri artırma stratejileriyle ve CLAHE gibi ön işleme algoritmalarıyla donatılması zorunludur. Ayrıca bitki yoğunluğunun arttığı orta sezonda yabancı otların ekin yaprakları altında kalması tespiti fiziksel olarak imkansız hale getirebilir ve bu da müdahalenin erken büyüme aşamasında yapılmasının stratejik önemini göstermektedir (Mexicano et al., 2025).

Ekonomik açıdan bakıldığında, sistemlerin yatırım getirisi oldukça umut vericidir. İHA ve robotik sistemlerin ilk yatırım maliyeti yüksek görünse de herbisit kullanımındaki %70-90 oranındaki azalma ve verimdeki %10-15'lik artış sistemlerin 1 yıldan kısa sürede kendisini amorti etmesini sağlayabilir. Ancak bu teknolojilerin küçük çiftçiler arasında yaygınlaşması için kooperatif modelleri ve düşük maliyetli donanım çözümleri gereklidir. Dijital bölünmenin önlenmesi AI destekli tarımın

sadece büyük endüstriyel işletmelerin değil tüm üreticilerin erişimine sunulması sürdürülebilir kalkınma için hayati bir önem taşımaktadır.

7.3. Hibrit Sistemlerin Geleceği ve Sonuç

Yabani ot yönetiminin geleceği farklı teknolojilerin güçlü yanlarını birleştiren hibrit sistemlerde yatmaktadır. RGB kameraların sunduğu mekânsal detaylar ile multispektral sensörlerin sunduğu spektral zenginliğin füzyonu sahadaki hata payını minimuma indirecektir (Osorio, Puerto, Pedraza, Jamaica, & Rodríguez, 2020).

Sonuç olarak AI tabanlı yabani ot tespiti sistemleri çevresel kirliliği azaltan, kimyasal direncini yöneten ve gıda güvenliğini destekleyen devrimsel bir araçtır. Ancak bu sistemler kur ve unut mantığıyla değil tarladaki yeni yabani ot türlerine ve iklimsel değişimlere göre sürekli güncellenen yaşayan yapılar olarak tasarlanmalıdır. Hibrit modellerin kenar bilişimin ve bulut tabanlı merkezi yönetim sistemlerinin entegrasyonu hassas tarımı laboratuvarından çıkarıp küresel ölçekte sürdürülebilir bir tarımsal standart haline getirecektir.

8. GELECEK ARAŞTIRMA YÖNLERİ

Derin öğrenme tabanlı yabani ot tespiti teknolojileri ticari uygulamalara ve pilot aşamalara oldukça yaklaşmış olsa da tarımsal ekosistemin dinamik yapısı araştırmacılar için yeni ve heyecan verici kapılar açmaktadır. Gelecek vizyonu sadece tespit etme odaklı sistemlerden kararlarını açıklayabilen farklı duylardan gelen bilgiyi harmanlayan ve tamamen otonom bir döngü içinde çalışan akıllı sistemlere doğru evrilmektedir. Bu evrim Açıklanabilir Yapay Zeka, multimodal füzyon, kapalı döngü otonom yönetim ve yeni nesil öğrenme paradigmaları olmak üzere dört ana sütun üzerinde yükselmektedir.

Derin öğrenme modellerinin siyah kutu doğası, özellikle kritik tarımsal kararlarda bir güven bariyeri oluşturmaktadır. Çiftçiler ve ziraatçiler bir modelin neden bir ekin bitkisini yabancı ot olarak işaretlediğini anlamak isterler. Bu şeffaflık sadece güveni artırmakla kalmaz aynı zamanda modeldeki hataların ayıklanmasına ve Avrupa Birliği Yapay Zeka Yasası gibi düzenleyici gerekliliklere uyum sağlanmasına yardımcı olur.

Tek başına RGB kameralar aydınlatma ve görsel benzerlik sorunları nedeniyle her zaman yeterli olmayabilir. Geleceğin sistemleri RGB'nin yüksek uzamsal detayını, multispektral sensörlerin fizyolojik verisiyle ve LiDAR'ın sunduğu 3D yapısal bilgiyle birleştiren multimodal bir yaklaşım sergileyecektir. Dikkat tabanlı füzyon gibi ileri teknikler hangi sensörün hangi koşulda daha güvenilir olduğunu otomatik olarak öğrenir. Bu duyuşal zenginlik sistemlerin oklüzyon ve zorlu hava koşullarına karşı direncini maksimize eder.

9. SONUÇ ÖNERİLER VE GENEL DEĞERLENDİRME

Bu kitap bölümünde detaylandırılan derin öğrenme tabanlı yabancı ot tespiti teknolojileri tarımsal üretimde verimliliği artırmak ve çevresel sürdürülebilirliği sağlamak adına devrim niteliğinde bir dönüşümü temsil etmektedir. İncelenen çalışmalarda %84 ile %98,9 arasında değişen doğruluk oranlarıyla, yapay zekanın tarla koşullarında insan uzman performansına ulaştığını ve hatta geçtiğini kanıtlamıştır. Elde edilen bulguları sentezleyerek paydaşlara yönelik stratejik öneriler sunmakta ve yabancı ot yönetiminin geleceğine dair bir perspektif çizmektedir.

İncelenen modeller arasında YOLO ailesi gerçek zamanlı nesne tespiti ve hassas lokalizasyon yetenekleriyle öne çıkmıştır. Öte yandan MobileNetV2 gibi hafif mimarilerin sergilediği

parametre verimliliği, yüksek performansın her zaman büyük modellere bağlı olmadığını akıllı mimari tasarımının kısıtlı donanımlarda bile yüksek doğruluk sağlayabileceğini göstermiştir.

Hassas yabancı ot yönetiminin en güçlü yönlerinden biri sunduğu hızlı yatırım geri dönüşüdür. 100 hektarlık bir çiftlik senaryosunda herbisit kullanımındaki %70'lik azalma ve verimdeki %10'luk artış sistemin kurulum maliyetini yaklaşık 8-9 ay gibi kısa bir sürede amorti etmesini sağlamaktadır. Bu ekonomik tablo otonom tarım teknolojilerinin sadece büyük işletmeler için değil kooperatif modelleri aracılığıyla küçük ölçekli çiftçiler için de rasyonel bir yatırım olduğunu ortaya koymaktadır.

Yabancı ot yönetimi, reaktif bir problem olduğunda müdahale et yaklaşımından otonom sistemlerin 24/7 tarla izlemesi yaptığı proaktif bir sürekli optimizasyon sürecine evrilmektedir. Gelecekte keşif yapan İHA'lar ile müdahaleyi gerçekleştiren yer robotlarının koordineli çalıştığı kapalı döngü sistemler kaynak israfını ve herbisit direncini minimuma indirecektir.

Bu teknolojik sıçrama küresel gıda güvenliği ve iklim değişikliğine adaptasyon stratejilerinin temel taşıdır. Derin öğrenme tabanlı yabancı ot tespiti sadece bir mühendislik başarısı değil gıdanın daha güvenli, toprağın daha sağlıklı ve üretimin daha karlı olduğu sürdürülebilir bir tarım geleceğinin anahtarıdır. Sonuç olarak paydaşların iş birliği ve etik sorumluluk bilinciyle bu teknolojileri benimsemesi hem bugünün hem de yarının dünyası için kalıcı faydalar sağlayacaktır.

KAYNAKÇA

- Celik, F., Balik Sanli, F., & Bozic, D. (2024). Transformer Networks To Classify Weeds And Crops In High-Resolution Aerial Images From North-East Serbia. *Turkish Journal of Field Crops*, 29(2), 112–120. doi:10.17557/tjfc.1511404
- Gattal, A., Nait-Hamoud, M.-C., Gattal, M.-F., Hadji, H., & Cheriet, M. (2025). Automated Weed Detection in Agriculture: A Performance Evaluation of YOLOv8 and InceptionV3 Models. In T. Marir, M. Bouzid, R. Benaboud, & A. Bourouis (Eds.), *Proceedings of the 3rd International Conference on Computer Science's Complex Systems and Their Applications* (pp. 86–100). Cham: Springer Nature Switzerland.
- Goyal, R., Nath, A., Niranjana, U., & Niyogi, R. (2025). Weed Detection in Potato Fields: A Comparative Study of YOLOv8 and YOLOv9 with UAV Imagery. In L. Barolli (Ed.), *Advanced Information Networking and Applications* (pp. 286–296). Cham: Springer Nature Switzerland.
- Gupta, S. K., Agarwal, S., Garg, Y., & Pandey, D. (2025). Automatic Weed Detection Using CNN. In S. Tiwari, M. C. Trivedi, M. L. Kolhe, & B. K. Singh (Eds.), *Advances in Data and Information Sciences* (pp. 345–355). Singapore: Springer Nature Singapore.
- Jackson, P. T., Atapour-Abarghouei, A., Bonner, S., Breckon, T., & Obara, B. (2018). Style Augmentation: Data Augmentation via Style Randomization. Retrieved from <http://arxiv.org/abs/1809.05375>
- Kholiya, D., Mishra, A. K., Pandey, N. K., & Tripathi, N. (2023). Plant Detection and Counting using Yolo based

- Technique. In 2023 3rd Asian Conference on Innovation in Technology, ASIANCON 2023. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. doi:10.1109/ASIANCON58793.2023.10270530
- Lakshmi Narayana, C., & Venkata Ramana, K. (2023). An Efficient Real-Time Weed Detection Technique using YOLOv7. IJACSA) International Journal of Advanced Computer Science and Applications (Vol. 14). Retrieved from www.ijacsa.thesai.org
- Li, J., Zhang, F., Qian, X., Zhu, Y., & Shen, G. (2015). Quantification of rice canopy nitrogen balance index with digital imagery from unmanned aerial vehicle. *Remote Sensing Letters*, 6(3), 183–189. doi:10.1080/2150704X.2015.1021934
- Louargant, M., Villette, S., Jones, G., Vigneau, N., Paoli, J. N., & Gée, C. (2017). Weed detection by UAV: simulation of the impact of spectral mixing in multispectral images. *Precision Agriculture*, 18(6), 932–951. doi:10.1007/s11119-017-9528-3
- Mehta, S., & Rastegari, M. (2021). MobileViT: Light-weight, General-purpose, and Mobile-friendly Vision Transformer. Retrieved from <http://arxiv.org/abs/2110.02178>
- Mexicano, A., Carmona, J. C., Cervantes, S., Bee, K., & Montes, P. N. (2025). Weed Detection in a Sunflower Field Using Supervised Learning Techniques. In L. Barolli (Ed.), *Advances on P2P, Parallel, Grid, Cloud and Internet Computing* (pp. 374–384). Cham: Springer Nature Switzerland.
- Osorio, K., Puerto, A., Pedraza, C., Jamaica, D., & Rodríguez, L. (2020). A Deep Learning Approach for Weed Detection

- in Lettuce Crops Using Multispectral Images. *AgriEngineering*, 2(3), 471–488. doi:10.3390/agriengineering2030032
- Ramalakshmi, K. S., Karmakar, K., Bajaj, K., Abhimanyu, K., & Srinivasa, G. (2025). Enhanced Deep Learning Models for Real-Time Weed Classification on the Edge. In A. Verma, J. Zhang, & A. Chandra Pandey (Eds.), *Business Intelligence and Data Analytics* (pp. 493–506). Singapore: Springer Nature Singapore.
- Rasmussen, J., Nielsen, J., Streibig, J. C., Jensen, J. E., Pedersen, K. S., & Olsen, S. I. (2019). Pre-harvest weed mapping of *Cirsium arvense* in wheat and barley with off-the-shelf UAVs. *Precision Agriculture*, 20(5), 983–999. doi:10.1007/s11119-018-09625-7
- Sandler, M., Howard, A., Zhu, M., Zhmoginov, A., & Chen, L. C. (2018). MobileNetV2: Inverted Residuals and Linear Bottlenecks. In *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* (pp. 4510–4520). IEEE Computer Society. doi:10.1109/CVPR.2018.00474
- Yun, S., Han, D., Oh, S. J., Chun, S., Choe, J., & Yoo, Y. (2019). CutMix: Regularization Strategy to Train Strong Classifiers with Localizable Features. Retrieved from <http://arxiv.org/abs/1905.04899>
- Zu, J., Yang, H., Wang, J., Cai, W., & Yang, Y. (2024). Inversion of winter wheat leaf area index from UAV multispectral images: classical vs. deep learning approaches. *Frontiers in Plant Science*, 15. doi:10.3389/fpls.2024.1367828

HYDROGEN ENERGY IN VEHICLES: TECHNOLOGIES AND TRENDS

Gökhan ÖZTÜRK¹

Müjdat FIRAT²

1. INTRODUCTION

Factors such as population growth, technological developments and industrialisation are rapidly increasing global energy demand, yet a large portion of this demand is still met by fossil fuels (Çelebi et al., 2024; Öztürk et al., 2025). Access to fossil fuels has become not only a fundamental indicator of economic wealth, but also a major source of international conflicts and wars (Klosek, 2018). However, with the global recognition of the risks associated with the exploitation of fossil fuels, it is understood that the energy sector has entered a transition process to shift towards renewable energy (Kåberger, 2018; Karaman et al., 2025; Öztürk et al., 2024). Even if the transition to renewable energy is made, the use of renewable energy in the transport sector will continue to be internal combustion engines. Internal combustion engines will likely remain the trend for vehicles used for transport purposes worldwide for a very long time to come (Wang et al., 2017). Efforts to eliminate environmental pollutants highlight the need for sustainable solutions and emphasise the importance of clean energy Technologies (Altunkaynak & Canpolat, 2025; Canpolat,

¹ Lecturer: Department of Mechanical and Metal Technologies, Vocational School of Technical Sciences, Batman University, TÜRKİYE. ORCID: 0000-0002-2780-6966.

² Assoc. Prof. Dr.; Department of Automotive Engineering, Faculty of Technology, Fırat University. TÜRKİYE. ORCID: 0000-0001-6978-9044.

2023; Canpolat & Altunkaynak, 2024). It is precisely at this point that hydrogen emerges as an ideal alternative for internal combustion engines. The goals of combating climate change and reducing urban air pollution necessitate solutions that provide zero exhaust emissions, while hydrogen is an energy carrier that produces only water vapour and has the highest energy density by mass (Rosen & Koohi-Fayegh, 2016). Moreover, with its long range, rapid refuelling and versatile applicability spanning from passenger cars to heavy-duty vehicles, it offers a strategic solution that overcomes the current limitations of battery electric vehicles.

2. PROPERTIES OF HYDROGEN AND METHODS OF PRODUCTION

2.1. Physical and Chemical Properties of Hydrogen

Hydrogen is the lightest element in the periodic table, with a volumetric density of only 0.0899 kg/m^3 under standard atmospheric conditions; this low density creates fundamental challenges in storage and distribution processes. Furthermore, its combustion properties, such as a wide flammable concentration range (4-75% by volume in air) and low minimum ignition energy (0.02 mJ), make its use both efficient and demanding (Yao et al., 2020). In contrast, its significantly lower density compared to air means it disperses rapidly in the event of a leak, making it easier to manage safety risks. Hydrogen can be considered an environmentally benign energy carrier, as its utilization does not result in harmful exhaust emissions and it enables electricity generation with high efficiency through fuel cell systems. Indeed, hydrogen has a specific energy content of approximately 122 kJ/g, which is 2.75 times higher than that of hydrocarbon fuels (Kapdan & Kargi, 2006). Table 1 lists the physical and chemical properties of hydrogen.

**Table 1. The physical and chemical properties of hydrogen
(Hosseini & Wahid, 2016)**

Density at STP (Kg/m ³)	0.084
Heat of vaporization(J/g)	445.6
Lower heating value (KJ/g)	119.93
High heating value (KJ/g)	141.8
Thermal conductivity at std. condition (mW/cm/K)	1.897
Diffusion coefficient in air at std. condition (cm ² s)	0.61
Flame ability limits in air (vol%)	4.0–75
Detonability limits in air (vol%)	18.3–59
Limiting oxygen index (vol%)	5.0
Stoichiometry composition in air (vol%)	29.53
Minimum energy of ignition in air (Mj)	0.02
Auto-ignition temperature (K)	858
Flame Temperature in air (K)	2318
Maximum burning velocity in air at std. condition (m/s)	3.46
Detonation velocity in air at std. condition (Km/s)	1.48–2.15
Energy of explosion mass related g TNT(g)	24.0
Energy of explosion volume related g TNT (m ³) (STP)	2.02

2.2. Hydrogen Production Methods

Hydrogen is the lightest element in the periodic table and exists as a gas with high flammability. The production of hydrogen is commonly categorized using colour-based classifications that reflect the feedstock, production pathways, and associated greenhouse gas emissions. Brown hydrogen is obtained from lignite through gasification processes, whereas black hydrogen is derived from bituminous coal using similar methods; both production routes result in the release of carbon dioxide into the atmosphere. Grey hydrogen is generated from natural gas via steam methane reforming, during which carbon dioxide emissions occur. White hydrogen refers to naturally occurring hydrogen found in trace amounts in the environment.

Blue hydrogen is also produced from natural gas through steam reforming; however, in this pathway, a significant portion of the carbon dioxide produced is captured and stored in geological formations. Due to these characteristics, blue hydrogen is considered a low-carbon hydrogen type and a solution in the decarbonisation process. However, the development of carbon capture and storage technologies continues. Turquoise hydrogen is produced from natural gas using the pyrolysis method, and solid carbon is produced during this process. It is a type of hydrogen produced with low carbon emissions, similar to blue hydrogen. However, it is more feasible to store solid carbon rather than carbon dioxide in gaseous form. Nevertheless, the low carbon emission rate of this hydrogen depends on the storage method and whether the source of the high heat required for pyrolysis is renewable. Red hydrogen is produced using the thermolysis method (catalytic decomposition of water at high temperatures), and no carbon emissions are observed during this process, which yields hydrogen and oxygen. In this context, the thermal and electrical energy required for the process is provided by nuclear power facilities. Pink (or purple) hydrogen is generated through water electrolysis, where the electricity is supplied from nuclear energy sources, resulting in hydrogen production without direct carbon emissions. Yellow hydrogen is likewise produced via water electrolysis; however, in this case, the electrical energy is drawn from the general power grid without specifying the primary energy source, and the hydrogen production process itself does not involve direct carbon emissions. However, depending on the source of electricity used in electrolysis, carbon emissions may occur. Green Hydrogen is produced by using electricity from renewable sources for the electrolysis of water, and there are no carbon emissions either during the electrolysis process or during electricity generation. It is of great importance that hydrogen produced in line with global decarbonisation targets is ‘Green Hydrogen’ (Bilişim, n.d.;

Hermesmann & Müller, 2022; Milewski et al., 2021; Sheu et al., 2022a). Figure 1 shows the production methods according to the colour class of hydrogen.

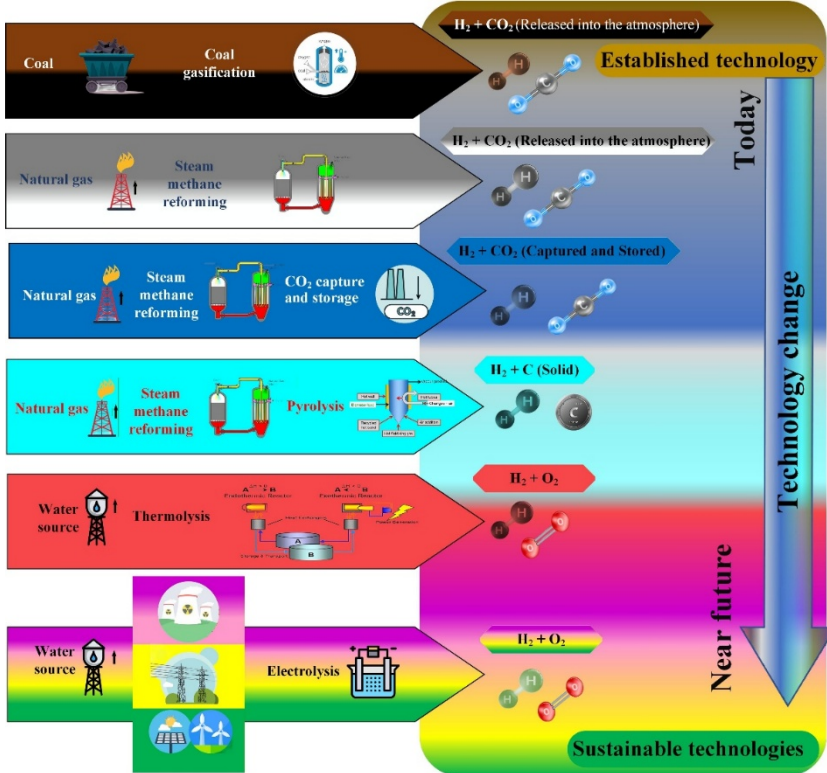


Figure 1. The common classification of hydrogen production methods according to colours frequently associated with them.

Hydrogen generation from fossil fuel sources is facilitated via processes such as steam reforming, petroleum oxidation, natural gas reforming, and coal gasification. Electrolysis represents an additional methodology for hydrogen production that is classified within the domain of water splitting. Thermolysis is employed to extract hydrogen from water through thermal treatment at elevated temperatures. Hydrogen production from biomass is also a promising method that includes pyrolysis,

biomass gasification, biophotolysis, and photofermentation (Purayil et al., 2023; Sheu et al., 2022b).

3. HYDROGEN STORAGE

To optimise the range and performance of vehicles, hydrogen must be stored safely and compactly within the vehicle. Storage must meet volumetric and gravimetric energy density targets.

3.1. Storage in Compressed Gas Form (CGH₂)

It is the most common form of hydrogen storage. Pressurised gas storage vessels are classified into different types based on their structural characteristics and load-bearing mechanisms. Type I vessels consist of entirely metal cylinders with domed heads, and the entire internal pressure load is borne by the metal structure. Type II containers have a metal liner, which is reinforced with composite material in the circumferential direction, with approximately 55% of the internal pressure being borne by the metal liner. Type III containers have a structure in which the metal liner is completely wrapped in composite material, with up to 80% of the pressure load being borne by the composite wrap. Type IV vessels use a non-load-bearing plastic liner (e.g., high-density polyethylene) with a fully composite outer wrapping structure; the liner ensures the containment of the gas and acts as a mould for the filament winding process. Type V vessels are defined as pressurised vessels with a fully composite shell structure, containing no liner (Fowler et al., 2016). Figure 2 shows hydrogen storage models.

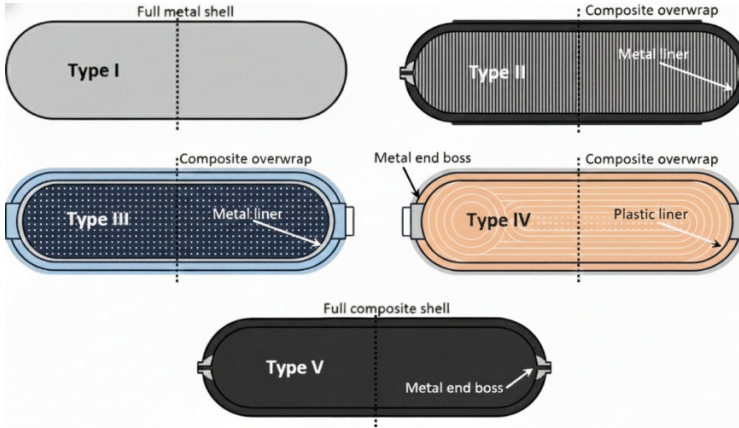


Figure 2. Hydrogen storage types (Fowler et al., 2016)

In vehicle-mounted applications, composite-based Type III and Type IV pressurised tanks are considered among the most suitable solutions due to the structural advantages they offer. The working pressure of composite tanks used in automotive applications is mostly around 350 bar. Nevertheless, to ensure a continuous driving range of around 400 km in next-generation hydrogen-powered vehicles, it is necessary to store approximately 4 kg of hydrogen gas onboard. This requirement corresponds to an internal volume of approximately 22.5 litres, which is quite high in terms of new generation vehicle designs. Reducing the internal volume is possible by storing hydrogen at higher pressures, for example at 700 bar (Kartav, 2020).

3.2. Liquid Hydrogen Storage (LH₂)

Hydrogen is liquefied at cryogenic temperatures (-253 °C). LH₂ offers high volumetric density and is therefore attractive for long-range heavy-duty vehicles and aviation applications. However, maintaining this temperature requires strong insulation, and the issue of boil-off, which causes energy loss, must be managed. The cryogenic compressed storage approach combines the advantages of methods for storing hydrogen as both a compressed gas and a liquid. This system has been developed to

minimise evaporation-related losses encountered in liquid hydrogen storage while maintaining high energy density. Hydrogen is stored in insulated tanks designed to withstand environmental conditions down to cryogenic temperatures (approximately 20 K) and high pressures (at least 30 MPa). The high-pressure resistance of the tank structure allows for higher pressure increases to be tolerated before hydrogen undergoes phase change. This feature significantly extends the time before evaporation losses begin during operation in cryogenic pressure vessels, thereby increasing the autonomy of the storage system (Barthelemy et al., 2017).

3.3. Metal Hydride Storage

The storage of hydrogen in solid form is achieved using metal and alloy-based materials that can absorb hydrogen through chemical or semi-chemical interactions. In this method, hydrogen diffuses into the metal or alloy structure under suitable pressure and temperature conditions and is stored in the form of metal hydrides by forming metal-hydrogen bonds. This process is reversible, and hydrogen can be released in a controlled manner by changing the system conditions. Solid-state hydrogen storage systems stand out due to their high volumetric storage density and safe operating characteristics; however, the kinetics of hydrogen absorption and release, along with the thermal management requirements of the material, are among the key factors determining system performance. Therefore, material selection, alloy composition, and optimisation of operating conditions are critical in metal hydride-based storage approaches (Sakintuna et al., 2007).

Methods developed for hydrogen storage are not limited to physical storage techniques alone, but also encompass alternative approaches based on different materials and chemical principles. In this context, chemical hydrogen storage systems,

organic liquid carriers, sorbent-based materials, and complex hydride structures are among the prominent methods. In chemical storage approaches, hydrogen is held within specific compounds through chemical bonds and released when suitable reaction conditions are provided. Organic liquid hydrogen carriers enable the storage of hydrogen in the liquid phase, offering solutions compatible with existing fuel infrastructure. Sorbent materials enable hydrogen to be stored physically or chemically through surface interactions, while complex hydrides offer high theoretical storage capacities due to their high hydrogen content. Each of these storage methods has different advantages and limitations in terms of numerous parameters, such as hydrogen storage capacity, hydrogen absorption and release kinetics, operating temperature and pressure ranges, total mass and volume of the system, operational safety, and economic feasibility. Therefore, selecting the most suitable hydrogen storage method for a specific application requires a joint assessment of performance requirements and technical and economic constraints (Mehrabanbardar et al., 2025).

4. THE USE OF HYDROGEN IN VEHICLES

Hydrogen is considered an environmentally friendly alternative fuel in the transport sector due to its carbon-free structure and high specific energy value. The increasing global demand for energy and emission reduction targets have accelerated research and development efforts into the use of hydrogen in vehicles. Hydrogen offers flexible solutions for current and future vehicle technologies as it can be used in conjunction with different energy conversion systems.

The use of hydrogen in vehicles provides significant advantages in terms of increasing energy efficiency, reducing harmful exhaust emissions, and decreasing dependence on fossil

fuels. However, technical and economic issues such as the production, storage, transportation, and safe use of hydrogen in vehicles are among the key factors affecting the widespread adoption of applications in this field. In this context, hydrogen is considered a fuel that can be adapted to different powertrain systems, and approaches to its use in vehicles are generally examined under the headings of fuel cell systems and internal combustion engines. Figure 3 shows the use of hydrogen in vehicles.

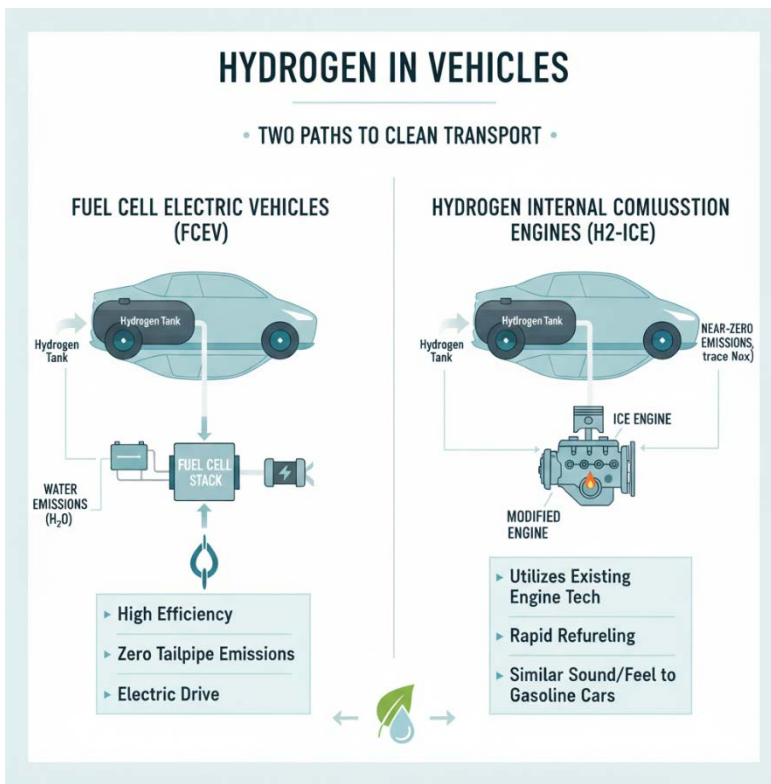


Figure 3. The use of hydrogen in vehicles

4.1. Fuel Cell Electric Vehicles (FCEVs)

These systems, also known as fuel cells, were first introduced by William Grove in 1839; however, the technology remained within a limited field of interest for approximately 120

years. With their renewed prominence, particularly within space programmes, intensive research and development activities have been conducted on fuel cells, resulting in significant advances. Today, fuel cells are among the electrochemical energy conversion systems used as part of the propulsion systems in electric and hybrid vehicles. Fuel cells, which can also be used as an independent power source in vehicles, store energy in chemical form and convert this energy directly into electrical energy. Structurally similar to electrochemical batteries, fuel cells consist of three basic components: an anode, a cathode, and an electrolyte. It is stated that during the operating life of fuel cells, the capacity reduction observed in conventional batteries does not occur, and these systems do not require recharging. Provided that fuel and oxidising agents are continuously supplied to the system, fuel cells can generate electrical energy without interruption. The electricity generation process is achieved through hydrogen–oxygen-based electrochemical reactions occurring between the anode and cathode electrodes. As a result of these reactions, water and heat energy are released as by-products, in addition to electrical energy. It is stated that the required oxygen is mostly obtained from atmospheric air, while hydrogen is obtained from the fuel used (MEGEP, 2014, n.d.).

Fuel cells are classified based on the type of electrolyte and fuel used; they are primarily categorised into six main groups: Molten Carbonate Fuel Cells (MCFC), Solid Oxide Fuel Cells (SOFC), Alkaline Fuel Cells (AFC), Proton Exchange Membrane Fuel Cells (PEMFC), Phosphoric Acid Fuel Cells (PAFC), and Direct Methanol Fuel Cells (DMFC).

4.1.1. Molten carbonate fuel cells (MCFC)

Molten carbonate fuel cells have long start-up times due to their high operating temperatures, yet they exhibit high efficiency and fast electrochemical reaction characteristics. Their

ability to operate with different fuel types and their structure suitable for high power generation make MCFCs particularly suitable for large-scale stationary energy production systems. However, factors such as the need for preheating, material stability, and limited operating life are among the key factors limiting the widespread use of this technology (Kaya, 2018).

4.1.2. Solid oxide fuel cells (SOFC)

Solid oxide fuel cells are a type of fuel cell that uses a solid ceramic electrolyte and operates at high temperatures. Their internal reforming capability, absence of problems associated with liquid electrolytes, and high efficiency values are the key advantages of SOFCs. Furthermore, their lack of requirement for precious metal catalysts and their ability to operate with a wide variety of fuels make these systems a promising technology for the future. However, due to the high operating temperatures, long-term material durability and chemical compatibility between cell components must be ensured (Kaya, 2018).

4.1.3. Alkaline fuel cells (AFC)

Alkaline fuel cells are systems that use potassium hydroxide-based liquid electrolytes and operate at relatively low temperatures. High efficiency, fast start-up and the ability to use low-cost electrode materials are among the key advantages of AFCs. However, their low tolerance to carbon dioxide and carbon monoxide, the need for pure hydrogen and pure oxygen, and operational difficulties arising from the liquid electrolyte significantly limit the use of these systems, particularly in terrestrial and vehicle applications (Kaya, 2018).

4.1.4. Phosphoric acid fuel cells (PAFC)

Phosphoric acid fuel cells are systems that operate at moderate temperatures and utilise phosphoric acid as a proton-conducting electrolyte. Although they provide moderate

efficiency in electricity generation, high overall efficiency can be achieved in cogeneration applications. Although they have found a certain degree of application in commercial settings, their large size and high investment costs mean that they currently lag behind more advanced fuel cell Technologies (Kaya, 2018).

4.1.5. Direct methanol fuel cells (DMFC)

Direct methanol fuel cells are defined as fuel cells that use liquid methanol directly as fuel and contain a polymer electrolyte membrane. The ease of fuel storage and the absence of an external reforming process are the main advantages of these systems. However, power densities are limited due to the slow electrochemical oxidation of methanol, fuel crossover issues, and high catalyst requirements. Consequently, DMFCs are currently limited to portable electronic applications requiring low power (Kaya, 2018).

4.1.6. Proton exchange membrane fuel cells (PEMFC)

Proton exchange membrane fuel cells are fuel cell systems characterised by the use of solid polymer membranes with high proton conductivity and low operating temperatures. Owing to their high power density, rapid start-up capability, compact structure and low noise levels, these systems are regarded as one of the most appropriate fuel cell technologies for vehicular and portable applications. In proton exchange membrane fuel cells, hydrogen is catalytically split into protons and electrons at the anode; while the protons are transported through the membrane to the cathode, the electrons flow through an external circuit, thereby generating electrical power. Although limitations such as the use of platinum-based catalysts, sensitivity to hydrogen purity, and cost exist, recent efforts to reduce catalyst loading and develop alternative membrane materials indicate that these disadvantages can be overcome (Kaya, 2018). Table 2 provides a

comparison of some characteristics of fuel cells. Hidrojen Yakıt Hücreli Araçlarda Kontrol Stratejisi

Table 2. Comparison of Fuel Cell Technologies (Kaya, 2018)

Parameter	MCFC	SOFC	AFC	PEMFC	PAFC	DMFC
Electrolyte	Molten lithium carbonate solution	Solid oxide ceramic electrolyte	Potassium hydroxide	Polymer membrane	Phosphoric acid	Polymer membrane
Operating temperature (°C)	600–700	800–1000	60–100	60–80	160–220	110–130
Electrical efficiency (%)	45–60	45–60	60–70	40–60	40–45	35–60
System output (kW)	1–1000	<1–3000	10–100	1–250	50–1000	<1–10
Applications	Large distributed generation systems	Stationary power generation systems	Auxiliary power systems; space and military systems; distributed generation systems	Electric vehicles; portable power applications	Distributed generation systems; automotive propulsion systems	Portable power applications; light traction

4.2. Operating Principle of PEMFC Fuel Cells

The proton exchange membrane fuel cell (PEMFC), which is regarded as one of the most appropriate technologies for automotive applications, operates as an electrochemical energy conversion device. Proton exchange membrane fuel cells directly transform chemical energy into electrical energy and are especially suitable for vehicular use due to their relatively low operating temperatures. The fundamental structure of a PEM fuel cell comprises an anode, a cathode, and a solid polymer electrolyte membrane that enables proton conduction (Şenol & Üçgül, n.d.). Figure 4 shows a single polymer electrolyte membrane fuel cell.

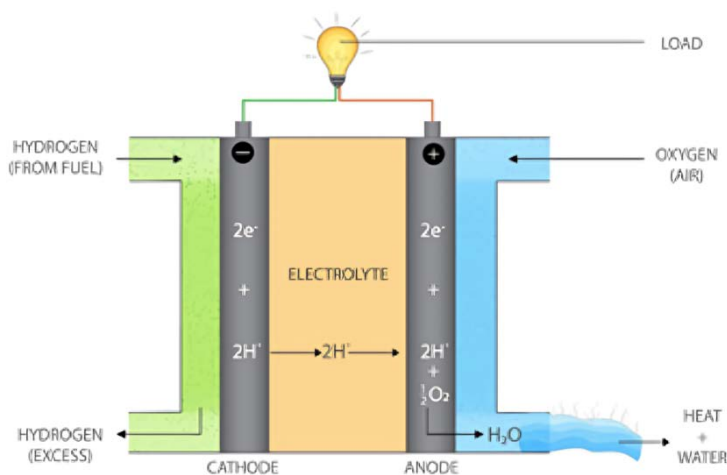


Figure 4. Single Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell (Singla et al., 2025)

During the operational phase, hydrogen gas is delivered to the anode compartment, whereas oxygen is conventionally introduced to the cathode compartment through ambient atmospheric air. In the anode domain, hydrogen molecules undergo dissociation into protons and electrons facilitated by a platinum-based catalytic agent. The resultant protons traverse the polymer electrolyte membrane, which is selectively permeable to ions, towards the cathode compartment, while the electrons are precluded from passing through the membrane, compelling them to navigate through an external electrical circuit, thereby producing electrical energy. On the cathode side, the protons arriving from the membrane react with the electrons arriving from the external circuit and oxygen molecules to form water and heat energy. The end products of this process in a PEM fuel cell are electrical energy, water, and waste heat. Maintaining the appropriate humidity level is crucial for the membrane to sustain its proton conductivity, and water management is one of the key parameters directly affecting PEMFC performance. Since the voltage produced by a single PEM fuel cell is low, cells are

connected in series in practical applications to form fuel cell stacks, thereby achieving the desired power and voltage levels. Thanks to their low emissions, quiet operation, and high efficiency, PEMFCs are the most widely used fuel cell technology, particularly in hydrogen fuel cell vehicles (*Şenol & Üçgül, n.d.*).

Modern FCEVs feature hybrid architectures that integrate a fuel cell stack, a high-voltage battery (to provide power boost during acceleration and recover energy through regenerative braking), hydrogen storage tanks, and a power control unit. This configuration enhances the system's dynamic performance while enabling more efficient energy management. The key advantages of FCEVs include zero emissions, as they only emit water vapour from the exhaust, a refuelling time comparable to that of traditional internal combustion vehicles (approximately 3–5 minutes), and the potential to offer a longer range than battery electric vehicles. Furthermore, FCEV technology provides a significant advantage in heavy-duty applications such as buses, trucks, and trains, which require high power and uninterrupted operation.

4.2. Hydrogen Internal Combustion Engine Vehicles (H₂-ICEV)

Hydrogen internal combustion engine vehicles (H₂-ICEVs) are alternative vehicle systems developed by adapting traditional internal combustion engine technology to use hydrogen fuel. In this approach, hydrogen is mixed with air inside the cylinder and burned, and the thermal energy obtained is converted into mechanical power. H₂-ICEVs are considered a transition technology because they can benefit from the existing engine production infrastructure and knowledge base in the automotive industry. Figure 5 shows an example of a zero-

emission vehicle using a direct hydrogen polymer electrolyte fuel cell.

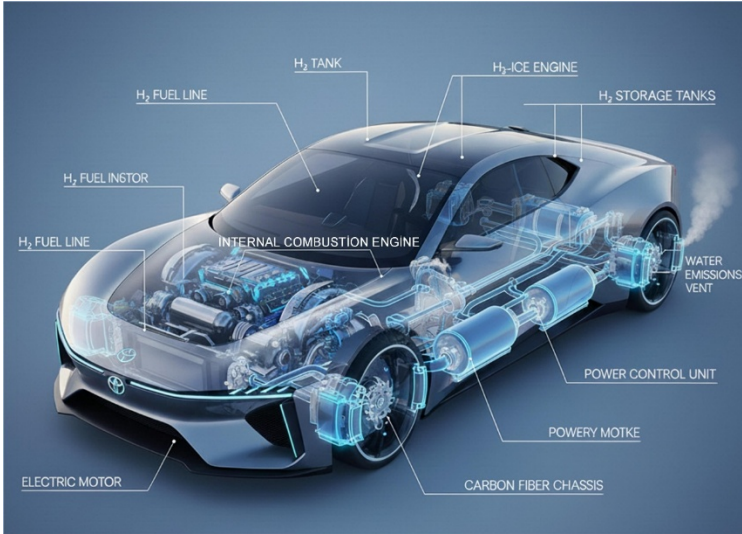


Figure 5. Zero-emission vehicle with direct hydrogen polymer electrolyte fuel cell

Hydrogen's high flame speed, wide flammability limits and low ignition energy enable increased combustion efficiency in H₂-ICEVs. However, hydrogen's low volumetric energy density and susceptibility to backfire require special engineering solutions in terms of intake system design and combustion control. Hydrogen internal combustion engines can be operated using port injection or direct injection methods; direct hydrogen injection, in particular, offers advantages in terms of reducing knock risk and increasing power density (Shadidi et al., 2021).

When evaluated in terms of emission characteristics, carbon dioxide (CO₂), carbon monoxide (CO) and hydrocarbon (HC) emissions are negligible in H₂-ICEVs due to the use of a carbon-free fuel. However, due to high combustion temperatures, nitrogen oxide (NO_x) formation may occur, which is limited by lean-burn strategies, exhaust gas recirculation (EGR) and

aftertreatment systems. The main advantages of H₂-ICEVs include high compatibility with existing internal combustion engine technologies, rapid refuelling, and suitability for heavy-duty applications. On the other hand, their lower thermodynamic efficiency compared to fuel cell electric vehicles and their dependence on hydrogen storage infrastructure are key limitations of these systems. In this context, hydrogen internal combustion engine vehicles are considered a complementary solution in the short to medium term during the transition to a hydrogen economy.

5. HYDROGEN FUEL INFRASTRUCTURE AND SAFETY

The widespread adoption of hydrogen necessitates the establishment of a reliable refuelling infrastructure. This infrastructure encompasses the safe transport of hydrogen from the production site to the refuelling station (pipelines, tankers) and its rapid refuelling into vehicles (approximately 700 bar). Safety is a fundamental factor in both technology development and public acceptance. Although hydrogen's ability to disperse rapidly in the event of a leak is an advantage, its wide flammability range and low ignition energy require special material selection, ventilation systems, and multi-layered safety sensors. International standards (ISO, SAE) have been meticulously developed to ensure the safety of high-pressure tanks and refuelling protocols. Type IV composite tanks used in vehicles offer a high level of safety, having been tested under extreme temperature and collision conditions.

6. MARKET OVERVIEW AND FUTURE EXPECTATIONS

Although FCEVs have a limited market share in the passenger vehicle segment, the strategic focus of global energy and automotive giants is on heavy-duty and commercial vehicles. Hydrogen fuel cells offer an ideal solution that overcomes battery weight and refuelling time constraints for freight trains, ships and long-range trucks. Governments in Europe, Asia, and North America are supporting this technology by publishing Hydrogen Strategies and providing billions of dollars in infrastructure and production incentives. Cost reductions are directly linked to increased production scale and AI-driven optimisation (Aslan, 2025; Birecikli et al., 2020). In the coming years, with the large-scale integration of hydrogen in the transport and industrial sectors, the hydrogen economy is expected to take shape.

7. CONCLUSION

The use of hydrogen in vehicles represents one of the most technically robust and strategically important solutions for decarbonising the transport sector. FCEV technology offers a unique combination of zero emissions, long range and rapid refuelling. Although production, storage, and infrastructure challenges persist, these issues are being systematically overcome through reductions in green hydrogen costs and, in particular, optimisation and innovation enabled by artificial intelligence. Hydrogen will play a critical role in achieving a fossil fuel-independent and sustainable transport future.

REFERENCES

- Altunkaynak, Y., & Canpolat, M. (2025). Effective removal of Cu (II) ions from aqueous solutions using low-cost, eco-friendly natural and modified potato peels. *Environmental Monitoring and Assessment*, 197(3), 309. <https://doi.org/10.1007/s10661-025-13762-8>
- Aslan, A. (2025). Deep Learning In Neurological Imaging: A Novel Cnn-Based Model For Brain Tumor Classification Türkiye And Health Risk Assessment. *İnönü Üniversitesi Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksek Okulu Dergisi*, 13(2), 457–474. <https://doi.org/10.33715/inonusaglik.1645318>
- Barthelemy, H., Weber, M., & Barbier, F. (2017). Hydrogen storage: Recent improvements and industrial perspectives. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(11), 7254–7262. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.03.178>
- Bilişim, Ç. (n.d.). *Hidrojenin Renkleri*. Retrieved December 13, 2025, from <https://www.tek-sis.com/tr/makale/9/hidrojenin-renkleri>
- Birecikli, B., Karaman, Ö. A., Çelebi, S. B., & Turgut, A. (2020). Failure load prediction of adhesively bonded GFRP composite joints using artificial neural networks. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 34(11), 4631–4640. <https://doi.org/10.1007/s12206-020-1021-7>
- Canpolat, M. (2023). Removing Co(II) and Mn(II) ions effectively from aqueous solutions by means of chemically non-processed Mardin stone waste: Equivalent, kinetic, and thermodynamic investigations. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 42(3), e14042. <https://doi.org/10.1002/ep.14042>
- Canpolat, M., & Altunkaynak, Y. (2024). Use of low-cost processed orange peel for effective removal of cobalt (II)

- and manganese (II) from aqueous solutions. *Ionics*, 30(1), 591–605. <https://doi.org/10.1007/s11581-023-05291-6>
- Çelebi, S., Karaman, Ö., & Öztürk, G. (2024). *Autonomous Driving Technologies and Cyber Security in Vehicles* (pp. 1–39).
- Fowler, C. P., Orifici, A. C., & Wang, C. H. (2016). A review of toroidal composite pressure vessel optimisation and damage tolerant design for high pressure gaseous fuel storage. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(47), 22067–22089. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.10.039>
- Hermesmann, M., & Müller, T. E. (2022). Green, Turquoise, Blue, or Grey? Environmentally friendly Hydrogen Production in Transforming Energy Systems. *Progress in Energy and Combustion Science*, 90, 100996. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2022.100996>
- Hosseini, S. E., & Wahid, M. A. (2016). Hydrogen production from renewable and sustainable energy resources: Promising green energy carrier for clean development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, 850–866. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.112>
- Kåberger, T. (2018). Progress of renewable electricity replacing fossil fuels. *Global Energy Interconnection*, 1(1), 48–52. <https://doi.org/10.14171/j.2096-5117.gei.2018.01.006>
- Kapdan, I. K., & Kargi, F. (2006). Bio-hydrogen production from waste materials. *Enzyme and Microbial Technology*, 38(5), 569–582. <https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2005.09.015>
- Karaman, Ö., Aslan, A., Öztürk, G., & Canpolat, M. (2025). *Machine Learning Algorithms For Electric Vehicle Charging Station Energy Consumption Prediction*.
- Kartav, O. (2020). *Design and Production of Light-Weight Pressure Resistant Composite Tank Materials and Systems for Hydrogen Storage* [Ph.D.].

- <https://www.proquest.com/docview/2665129935/abstract/B10C1FB9C133459DPQ/1>
- Kaya, K. (2018). *Hidrojen yakıt hücreli araçlarda kontrol stratejisi geliştirilmesi* [Master's thesis, İskenderun Teknik Üniversitesi].
<https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezSorguSonucYeni.jsp>
- Klosek, K. C. (2018). Catalysts of violence: How do natural resource extractive technologies influence civil war outbreak and incidence in sub-Saharan Africa? *The Extractive Industries and Society*, 5(2), 344–353.
<https://doi.org/10.1016/j.exis.2018.02.003>
- MEGEP, 2014. (n.d.). Retrieved December 13, 2025, from https://megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/moduller_pdf/Alternatif%20Yak%C4%B1tl%C4%B1%20Motorlar.pdf
- Mehrabianbardar, A., Shirinbayan, M., Jendli, Z., Gillet, S., Noura, S., & Fitoussi, J. (2025). A review: Challenges, processes, and innovations in high-pressure hydrogen storage technologies. *International Journal of Material Forming*, 18(3), 77. <https://doi.org/10.1007/s12289-025-01934-3>
- Milewski, J., Kupecki, J., Szcześniak, A., & Uzunow, N. (2021). Hydrogen production in solid oxide electrolyzers coupled with nuclear reactors. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(72), 35765–35776.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.11.217>
- Öztürk, G., Aslan, A., & Fırat, M. (2025). *The Effect of Dibutyl Maleate Additive on Combustion Characteristics in Compression Ignition Engines and Analysis of Performance Prediction Based on Machine Learning*.
- Öztürk, G., Çelebi, S., & Karaman, Ö. (2024). *Autonomous Vehicles: Systems, Technologies and Sensors* (pp. 34–81).

- Purayil, S. T. P., Hamdan, M. O., Al-Omari, S. A. B., Selim, M. Y. E., & Elnajjar, E. (2023). Review of hydrogen–gasoline SI dual fuel engines: Engine performance and emission. *Energy Reports*, 9, 4547–4573. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.03.054>
- Rosen, M. A., & Koochi-Fayegh, S. (2016). The prospects for hydrogen as an energy carrier: An overview of hydrogen energy and hydrogen energy systems. *Energy, Ecology and Environment*, 1(1), 10–29. <https://doi.org/10.1007/s40974-016-0005-z>
- Sakintuna, B., Lamari-Darkrim, F., & Hirscher, M. (2007). Metal hydride materials for solid hydrogen storage: A review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 32(9), 1121–1140. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2006.11.022>
- Şenol & Üçgül. (n.d.). Retrieved December 13, 2025, from https://mmo.org.tr/sites/default/files/f396fe44e7c05c1_ek.pdf
- Shadidi, B., Najafi, G., & Yusaf, T. (2021). A Review of Hydrogen as a Fuel in Internal Combustion Engines. *Energies*, 14(19), 6209. <https://doi.org/10.3390/en14196209>
- Sheu, W.-J., Chu, C.-S., & Chen, Y.-C. (2022a). The operation types and operation window for high-purity hydrogen production for the sorption enhanced steam methane reforming in a fixed-bed reactor. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(88), 37192–37203. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.11.112>
- Sheu, W.-J., Chu, C.-S., & Chen, Y.-C. (2022b). The operation types and operation window for high-purity hydrogen production for the sorption enhanced steam methane reforming in a fixed-bed reactor. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(88), 37192–37203. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.11.112>

- Singla, M. K., Aljaidi, M., Jangir, P., Arpita, Kumar, R., & Jangid, R. (2025). Parameter extraction of proton exchange membrane fuel cell using differential evolution-based artificial rabbits optimization. *Ionics*, 31(10), 10839–10878. <https://doi.org/10.1007/s11581-025-06566-w>
- Wang, Z., Liu, H., & Reitz, R. D. (2017). Knocking combustion in spark-ignition engines. *Progress in Energy and Combustion Science*, 61, 78–112. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2017.03.004>
- Yao, B., Kuznetsov, V. L., Xiao, T., Jie, X., Gonzalez-Cortes, S., Dilworth, J. R., Al-Megren, H. A., Alshihri, S. M., & Edwards, P. P. (2020). Fuels, power and chemical periodicity. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 378(2180), 20190308. <https://doi.org/10.1098/rsta.2019.0308>

ORGANİK ASİTLERİN HİDROMETALURJİDE KULLANIMI

Seda DEMİRCİ¹

1. GİRİŞ

Hidrometalurji, cevherlerden metal ve metal bileşiklerinin sulu çözeltiler kullanılarak elde edilmesini kapsayan bir etkili bir yöntemdir. Bu yaklaşımda, katı halde bulunan cevher içerisindeki metal değerlerin, uygun bir sulu çözelti ile reaksiyona girerek katı fazdan sıvı faza aktarılması esas alınmaktadır. Hidrometalurjik prosesler, metal içeren cevherin çözücü ortamla temas ettirilerek metal iyonlarının çözeltiye geçtiği liç işlemi ile başlamaktadır. Bu aşamayı, liç sonucunda elde edilen metal iyonlarının çözelti içerisinde geri kazanılması ve saflaştırılmasına yönelik işlemler izlemektedir. Bu kapsamda atmosfer basıncı altında liç (Havlik ve ark., 2005), otoklavlarda yüksek basınç ve sıcaklık altında gerçekleştirilen işlemler (Havlik ve ark., 2004), biyoliç (Falagan ve ark., 2017), mikrodalga destekli çözündürme (Harahsheh ve ark. 2004), asit kavurma (Demol ve ark., 2018) gibi farklı liç yaklaşımları uygulanabilmektedir. Liç sonrasında ise filtrasyon ve nötralizasyon (Pavlovic ve ark., 2007) gibi yardımcı basamakların ardından, metal iyonları çözücü ekstraksiyonu (Xie ve ark., 2014), iyon değiştirici reçinelerle saflaştırma ve sementasyon (Wang ve ark., 2015) yöntemleriyle çözelti ortamından ayrılmaktadır. Sürecin son aşamalarında, hedef metal değerler çöktürme, kristalizasyon, elektrokoagülasyon, sulu fazda indirgeme, sulu elektroliz, ergimiş tuz elektrolizi ile elektrokimyasal çöktürme (Peters ve ark., 2019) veya ultrasonik

¹ Öğr. Gör. Dr., Çukurova Üniversitesi, Aladağ Meslek Yüksekokulu, Madencilik ve Maden Çıkarma Bölümü, ORCID: 0000-0001-9577-4970

sprey piroliz (Majeric ve ark., 2020) gibi yöntemler kullanılarak metalik formda ya da bileşik hâlinde kazanılmaktadır (Stopic ve ark., 2021).

Liç işlemleri kullanılan çözücü türüne göre genel olarak asitli liç, alkali liç ve nötr liç olarak sınıflandırılmaktadır. Asitli liçte sülfürik, hidroklorik veya organik asitler yaygın olarak kullanılırken; alkali liç sistemlerinde genellikle sodyum hidroksit veya sodyum karbonat gibi çözeltiler tercih edilmektedir (Hussaini ve ark., 2021). Nötr liç için ise genellikle su veya zayıf tuz çözeltileri kullanılmaktadır. Son yıllarda çevresel etkilerin azaltılması, seçiciliğin artırılması ve düşük korozyon etkisi amacıyla organik asitlerin (metansülfonik asit, oksalik asit, sitrik asit, malik asit, asetik asit, glukonik asit vb.) liç ajanı olarak kullanımı giderek önem kazanmıştır (Hussaini ve ark., 2024).

Bu gelişmeler doğrultusunda, organik asitlerin hidrometalurjik liç sistemlerinde kullanımı, geleneksel inorganik asitlere alternatif oluşturan bir yaklaşım olarak öne çıkmaktadır. Özellikle oksalik, sitrik, malik ve glukonik asit gibi organik asitlerin farklı metal sistemlerindeki liç davranışları, çözünme mekanizmaları ve proses parametrelerine duyarlılıkları literatürde kapsamlı biçimde ele alınmaktadır.

2. ORGANİK ASİTLERİN HİDROMETALURJİDE KULLANIMININ TEMEL İLKELERİ

2.1. Organik Asitlerin Kimyasal Özellikleri

Organik asitler, yapılarında bir veya birden fazla karboksil grubu ($-COOH$) bulunduran ve sulu ortamlarda zayıf asidik karakter gösteren bileşiklerdir. Hidrometalurjik proseslerde kullanılan organik asitler genellikle zayıf asitler sınıfında yer almakta olup, sulu çözeltilerde kısmi iyonlaşma göstererek

ortamın pH değerini düşürmektedir. Bu özellik, organik asitlerin metal iyonları ile kontrollü ve seçici etkileşimler kurmasına olanak sağlamaktadır (Karaca, 2021).

Organik asitlerin asitlik derecesi, asit ayrışma sabiti (pKa) ile ifade edilmektedir. pKa değeri, bir asidin sulu ortamda proton verme eğilimini gösteren temel bir parametre olup, metal çözündürme davranışı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Düşük pKa değerine sahip asitler daha yüksek asidik karakter sergilerken, yüksek pKa değerine sahip asitler daha zayıf asit özellik göstermektedir (Zhang ve ark., 2024). Metal çözündürme işlemlerinde asidin etkinliği, pKa değeri ile ortam pH'ı arasındaki ilişkiye bağlıdır. Yüksek pKa'lı asitler daha dar ve nispeten yüksek pH aralıklarında etkili olurken, düşük pKa'lı asitler daha düşük pH koşullarında metal çözünmesini daha etkin şekilde gerçekleştirebilmektedir (Xiao ve ark., 2020).

2.2. Organik Asitlerde Metal Çözünme Mekanizması (Şelasyon, Kompleksleşme, Redoks Reaksiyonu)

Organik asitlerle metal çözünme mekanizması, temel olarak asitli çözünme, şelasyon veya kompleksleşme ve bazı durumlarda redoks reaksiyonları yoluyla gerçekleşmektedir. Bu mekanizmaların etkinliği; metalin türüne, organik asidin kimyasal yapısına ve ortam koşullarına bağlı olarak değişiklik göstermektedir (Lim ve ark., 2023).

Şelasyon, metal iyonunun organik asidin yapısında bulunan birden fazla bağlayıcı grup aracılığıyla halkalı yapıdaki kararlı kompleksler oluşurmasıyla meydana gelmektedir. Bu mekanizma sayesinde metal iyonları çözelti içerisinde kararlı hâlde tutulmakta ve yeniden çökelmeleri engellenmektedir (Fatima ve ark., 2025). Şelasyon mekanizması, özellikle düşük pKa değerine sahip olan sitrik asit, oksalik asit ve EDTA gibi çok fonksiyonel organik asitlerde daha güçlü şekilde gerçekleşmekte

ve metal çözünürlüğünü önemli ölçüde artırmaktadır (Sellal ve Belattar, 2020; Fatima ve ark., 2025).

Kompleksleşme ise organik asitlerin metal iyonları ile çözelti ortamında çözünür metal–ligand kompleksleri oluşturması olarak tanımlanmaktadır. Bu sayede metal iyonları asidik ortamda çözünmüş hâlde kalmakta ve daha sonra seçici yöntemlerle geri kazanılabilmektedir. Sitrik asit ve oksalik asit ile gerçekleştirilen liç işlemlerinde kompleksleşme mekanizmasının metal çözünmesinde belirleyici bir rol oynadığı literatürde yaygın olarak rapor edilmektedir (Lim ve ark., 2023; Fatima ve ark., 2025).

Bazı organik asitler ise metal çözünürlüğünü artırmak amacıyla redoks reaksiyonları yoluyla etki göstermektedir. Bu mekanizmada metalin oksidasyon basamağı değiştirilerek çözünür formda bulunması sağlanmaktadır. Örneğin askorbik asit, indirgeme özelliği sayesinde metal iyonlarının daha kolay çözünebilen türlere dönüşmesine katkı sağlamaktadır (Nayaka ve ark., 2015; Fatima ve ark., 2025).

2.3. Organik Asitlerle Liçte Proses Parametrelerinin Etkisi

Organik asitlerle metal liçinde; asit konsantrasyonu, sıcaklık, katı/sıvı oranı, liç süresi ve indirgen ajan kullanımı başlıca proses parametrelerini oluşturmaktadır. Bu parametreler, metal çözünme verimliliği üzerinde belirleyici rol oynamakta olup, prosesin optimizasyonu, verimliliği ve seçiciliği açısından büyük önem taşımaktadır.

Asit konsantrasyonunun artmasıyla metal çözünme verimliliği genellikle artmakta; ancak belirli bir derişimin üzerine çıkıldığında sistem doygunluğa ulaşmakta ve ilave asit artışının verim üzerinde anlamlı bir etkisi görülmemektedir (Liu ve ark., 2019; Wang ve ark., 2023, Nkechi ve ark., 2025).

Sıcaklığın yükseltilmesi, reaksiyon kinetiğini hızlandırarak metal çözünme hızını ve toplam çözünme verimini artırmaktadır. Bununla birlikte, yüksek sıcaklıkların enerji maliyetleri ve olası yan reaksiyonlar açısından dikkatle değerlendirilmesi gerekmektedir (Liu ve ark., 2019; Hussaini ve ark., 2024; Wang ve ark., 2023).

Katı/sıvı oranının azalması, çözelti içerisinde metal iyonlarının daha etkin dağılmasını sağlayarak çözünme verimini artırmaktadır. Ancak endüstriyel ve ekonomik uygulamalarda genellikle 1/10–1/20 aralığındaki katı/sıvı oranları tercih edilmektedir (Liu ve ark., 2019; Burgess ve ark., 2024; Wang ve ark., 2023).

Liç süresinin artmasıyla metal çözünme verimi başlangıçta yükselmekte, ancak belirli bir süreden sonra sistem dengeye ulaşarak çözünme hızında ve verimde artış gözlenmemektedir (Liu ve ark., 2019; Wang ve ark., 2023).

İndirgen ajan kullanımı ise özellikle Co, Ni ve Mn gibi yüksek değerlikli metal iyonlarının çözünürlüğünü artırarak reaksiyon hızını yükseltmekte ve dolayısıyla liç verimini önemli ölçüde etkilemektedir (Liu ve ark., 2019; Amalia ve ark., 2023; Wang ve ark., 2023).

2.4. Organik Asitlerle Liç Uygulamalarına Genel Bakış

Hidrometalurjik proseslerde inorganik asitlerin kullanımı; yüksek sıcaklık gereksinimi, yüksek asit tüketimi ve yoğun enerji girdileri nedeniyle önemli miktarda gaz emisyonuna yol açmakta ve bu durum proseslerin yüksek karbon ayak izine sahip olmasına neden olmaktadır. Buna karşılık, organik asitlerin hidrometalurjik liç proseslerinde kullanılması; daha düşük sıcaklık gereksinimi, bazı organik asitlerin biyolojik yollarla üretilebilmesi ve biyobozunur özellik göstermesi sayesinde SO₂ gibi toksik gaz emisyonlarının önlenmesine katkı sağlamaktadır. Bu özellikler,

organik asitlerle gerçekleştirilen liç proseslerinin daha düşük karbon ayak izine sahip olmasını sağlayarak çevresel sürdürülebilirliği artırmaktadır (Gerold ve ark., 2022; Bruno ve ark., 2024).

Endüstriyel minerallerin liçinde organik asitlerin, özellikle oksalik ve sitrik asidin, kullanımı; demir, alüminyum ve alkali metal içeren fazların seçici olarak çözündürülmesinde yaygın ve etkili bir yöntemdir. Bu yaklaşım, alunit, kil mineralleri ve kuvars esaslı sistemlerde istenmeyen safsızlıkların giderilmesine olanak sağlarken, hedef mineral fazın yapısının korunmasına katkı sağlamakta ve çevresel etkilerin azaltılmasına yardımcı olmaktadır (Özer ve ark., 2018).

Sitrik ve oksalik asitler, metal iyonları ile güçlü kompleksler oluşturarak bakır, çinko, nikel, kobalt ve manganez gibi metallerin çözünürlüğünü artırmaktadır. Bu mekanizma, özellikle düşük sıcaklık ve orta pH aralıklarında metal kazanımının etkin bir şekilde gerçekleştirilmesini mümkün kılmaktadır (Altıntaş ve ark., 2020).

Kırmızı çamur ve zenginleştirme artıkları gibi endüstriyel atıkların değerlendirilmesi, hem atıkların depolama alanı gereksiniminin azaltılması hem de çevre üzerindeki olumsuz etkilerinin en aza indirilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Bu tür atıkların, organik ve mineral asitlerin birlikte veya ayrı ayrı kullanıldığı hidrometalurjik liç yöntemleriyle işlenmesi; alüminyum, demir ve titanyum gibi değerli metallerin geri kazanılmasına olanak sağlamakta ve söz konusu atıkların ikincil hammadde kaynakları olarak değerlendirilmesine katkı sunmaktadır. Nitekim sitrik asit kullanılarak gerçekleştirilen liç uygulamalarında, asit konsantrasyonunun metal çözünme verimi üzerinde belirleyici bir parametre olduğu ve uygun koşullar altında %96'ya varan alüminyum kazanımının elde edilebildiği rapor edilmiştir (Turan, 2021).

Organik asitlerle gerçekleştirilen liç işlemlerinde, reaksiyon hızları genellikle inorganik asitlere kıyasla daha düşük olmakta, bu durum proses verimliliğini sınırlayan önemli bir etken olarak öne çıkmaktadır. Ayrıca, özellikle yüksek saflıkta organik asitlerin temini ve kullanımı, reaktif maliyetlerini artırarak endüstriyel ölçekte ekonomik uygulanabilirliği olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Bu nedenle, organik asitlerin endüstriyel uygulamalarında proses koşullarının optimize edilmesi, reaktif tüketiminin azaltılması ve kapsamlı maliyet-etkinlik analizlerinin yapılması büyük önem taşımaktadır (Civelek ve ark., 2021).

3. SONUÇ

Bu bölümde, organik asitlerin hidrometalurjik liç proseslerinde kullanımına ilişkin temel ilkeler, kimyasal özellikler, metal çözünme mekanizmaları, proses parametreleri ve uygulama alanları literatür ışığında kapsamlı biçimde ele alınmıştır. İncelenen çalışmalar, organik asitlerin geleneksel inorganik asitlere kıyasla daha kontrollü, seçici ve çevre dostu bir liç davranışı sergilediğini ortaya koymaktadır.

Organik asitlerin zayıf asidik karakteri, metal iyonları ile kompleksleşme ve şelasyon yetenekleri sayesinde özellikle düşük sıcaklık ve orta pH koşullarında etkin metal çözünmesini mümkün kılmaktadır. Bu durum, enerji tüketiminin azaltılması ve buna bağlı olarak hidrometalurjik proseslerin karbon ayak izinin düşürülmesi açısından önemli bir avantaj sağlamaktadır. Ayrıca bazı organik asitlerin biyolojik yollarla üretilebilmesi ve biyobozunur özellik göstermesi, bu reaktiflerin çevresel sürdürülebilirlik açısından öne çıkmasına katkı sunmaktadır.

Bununla birlikte, organik asitlerle liç proseslerinin endüstriyel ölçekte uygulanabilirliği açısından bazı sınırlamalar mevcuttur. Göreceli olarak düşük reaksiyon hızları, yüksek

saflıkta reaktif temininden kaynaklanan maliyetler ve proses süreleri, bu yöntemlerin endüstriyel tasarımında dikkate alınması gereken önemli faktörlerdir. Bu nedenle, proses parametrelerinin optimize edilmesi, reaktif geri kazanım stratejilerinin geliştirilmesi ve kapsamlı maliyet-etkinlik analizlerinin yapılması büyük önem taşımaktadır.

Sonuç olarak, organik asitlerle liç yöntemleri; çevresel sürdürülebilirlik, düşük karbon ayak izi ve seçici metal kazanımı gibi avantajlarıyla hidrometalurjik proseslerde gelecek vadeden bir yaklaşım olarak değerlendirilmektedir. Bu yöntemlerin, ileri proses optimizasyon çalışmaları ve entegre sistem tasarımları ile desteklenmesi halinde hem akademik araştırmalarda hem de endüstriyel uygulamalarda daha geniş bir kullanım alanı bulması beklenmektedir.

KAYNAKÇA

- Altıntaş, Z., Khoshsima, S., Somer, M., & Balcı, Ö. (2020). İkili ve üçlü kobalt bazlı metal borürlerin inorganik ergimiş tuz tekniği ile sentezi. *Boron*, 5, 12–22. <https://doi.org/10.30728/boron.613117>
- Amalia, D., Singh, P., Zhang, W., & Nikoloski, A. N. (2023). The effect of a molasses reductant on acetic acid leaching of black mass from mechanically treated spent lithium-ion cylindrical batteries. *Sustainability*, 15(17), 13171. <https://doi.org/10.3390/su151713171>
- Bruno, M., Francia, C., & Fiore, S. (2024). Closed-loop recycling of lithium iron phosphate cathodic powders via citric acid leaching. *Environmental Science and Pollution Research*. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-32837-6>
- Burgess, C., Okonkwo, E. G., & He, Y. (2024). Evaluating the performance of citric acid and maleic acid for mixed-acid leaching of critical metals from spent lithium-ion batteries. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 26, 3205–3216. <https://doi.org/10.1007/s10163-024-02041-2>
- Civelek, Z., & Özdemir, N. (2021). Organik atık ve polimer uygulamalarının toprakta doğrusal uzama katsayısı ve hacimsel büzülme değeri üzerine etkileri. *Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Dergisi*. <https://doi.org/10.33409/tbbbd.928758>
- Demol, J., Ho, E., & Senanayake, G. (2018). Sulfuric acid baking and leaching of rare earth elements, thorium and phosphate from a monazite concentrate: Effect of bake temperature from 200 to 800 °C. *Hydrometallurgy*, 179, 254–267.

- Falagan, C., Grail, B., & Johnson, D. (2017). New approaches for extracting and recovering metals from mine tailings. *Minerals Engineering*, 106, 71–78.
- Fatima, S., Khosa, M. K., Noor, A., & Qayyum, S. (2025). Valorization of coir peat in green extraction of valuable metals from spent lithium-ion batteries. *PLOS ONE*, 20(7), e0326867. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0326867>
- Gerold, E., Schinnerl, C., & Antrekowitsch, H. (2022). Critical evaluation of the potential of organic acids for the environmentally friendly recycling of spent lithium-ion batteries. *Recycling*, 7(1), 4. <https://doi.org/10.3390/recycling7010004>
- Harahsheh, M., & Kingman, S. (2004). Microwave assisted leaching—A review. *Hydrometallurgy*, 73, 189–203.
- Havlik, T., Friedrich, B., & Stopic, S. (2004). Pressure leaching of EAF dust with sulphuric acid. *Erzmetall World of Metallurgy*, 57(2), 113–120.
- Havlik, T., Turzakova, M., Friedrich, B., & Stopic, S. (2005). Atmospheric leaching of EAF dust with diluted sulphuric acid. *Hydrometallurgy*, 77(1–2), 41–50.
- Hussaini, S., Kursunoglu, S., Top, S., Ichlas, Z. T., & Kaya, M. (2021). Testing of 17 different leaching agents for the recovery of zinc from a carbonate-type Pb–Zn ore flotation tailing. *Minerals Engineering*, 168, 106935. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.106935>
- Hussaini, S., Tita, A. M., Kursunoglu, S., Kaya, M., & Chu, P. (2024). Leaching of nickel and cobalt from a mixed nickel–cobalt hydroxide precipitate using organic acids. *Minerals*, 14(3), 314. <https://doi.org/10.3390/min14030314>

- Karaca, S. (2021). Ağrı Ovası tarım topraklarındaki organik madde miktarının diğer toprak özellikleri ve coğrafi koşullarla ilişkisi. *Ağrı İbrahim Çeçen Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 7(1), 233–258. <https://doi.org/10.31463/aicusbed.837509>
- Lim, B., Alorro, R. D., Aylmore, M., & Grimsey, D. (2023). Complexation leaching of critical and strategic metals from nickel converter slag using organic acids. *Minerals Engineering*, 201, 108167. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2023.108167>
- Liu, B., Huang, Q., Su, Y., Sun, L., Wu, T., Wang, G., Kelly, R. M., & Wu, F. (2019). Maleic, glycolic and acetoacetic acids leaching for recovery of valuable metals from spent lithium-ion batteries: Leaching parameters, thermodynamics and kinetics. *Royal Society Open Science*, 6(9), 191061. <https://doi.org/10.1098/rsos.191061>
- Majeric, P., & Rudolf, R. (2020). Advances in ultrasonic spray pyrolysis processing of noble metal nanoparticles—A review. *Materials*, 13, 3485.
- Nayaka, G. P., Manjanna, J., Pai, K. V., Vadavi, R., Keny, S. J., & Tripathi, V. S. (2015). Recovery of valuable metal ions from spent lithium-ion batteries using aqueous mixtures of mild organic acids as alternatives to mineral acids. *Hydrometallurgy*, 151, 73–77. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2014.11.006>
- Nkechi, N., Theresa, O., & Chukwueke, N. (2025). Effect of organic acid concentration and leaching time on the efficiency of nickel and zinc recovery from waste printed circuit boards of mobile phones. *International Research Journal of Pure and Applied Chemistry*, 26(4), 125–136. <https://doi.org/10.9734/irjpac/2025/v26i4934>

- Özer, M., Başkurt, B., Burat, F., & Baştürkçü, H. (2018). Ön zenginleştirme sonrasında oksalik asit kullanımı ile cam kumu tesisi yan ürününden düşük demir içerikli mikronize kuvars üretimi. 57.
- Pavlović, J., Stopic, S., Friedrich, B., & Kamberovic, Z. (2007). Selective removal of heavy metals from metal-bearing wastewater in a cascade line reactor. *Environmental Science and Pollution Research*, 14(7), 518–522.
- Peters, E. M., Kaya, Ş., Dittrich, C., & Forsberg, K. (2019). Recovery of scandium by crystallization techniques. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 5, 48–56.
- Sellal, A., & Belattar, R. (2020). Study of the chelating ability of hexane, chloroform, ethyl acetate and methanolic root extracts from *Phragmites australis* species. *Journal of Drug Delivery and Therapeutics*, 10(4), 87–92.
- Stopic, S., & Friedrich, B. (2021). Advances in understanding of the application of unit operations in metallurgy of rare earth elements. *Metals*, 11(6), 978. <https://doi.org/10.3390/met11060978>
- Turan, M. (2021). Mekanik olarak aktive edilmiş kırmızı çamurdan değerli metallerin geri kazanılması. 33, 63–69. <https://doi.org/10.35234/fumbd.728978>
- Wang, H., & Friedrich, B. (2015). Development of a highly efficient hydrometallurgical recycling process for automotive Li-ion batteries. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 1, 168–178.
- Wang, J.-Z., Tang, Y.-C., & Shen, Y.-H. (2023). Leaching of Sm, Co, Fe, and Cu from spent SmCo magnets using organic acid. *Metals*, 13(2), 233. <https://doi.org/10.3390/met13020233>

Zhang, N., Chen, Y., Shi, L., Ran, Y., Zhang, H., Moon, H., Lee, Y., Yu, Q., Kim, J. S., & Li, K. (2024). De novo construction of pKa-tunable xanthene molecules for pH-sensitive fluorescence navigation. *Advanced Functional Materials*, 35(2), 2412595. <https://doi.org/10.1002/adfm.202412595>

ELEKTROKARDİYOĞRAFI İLE FİZYOLOJİK SİNYAL İZLEME: TEMEL İLKELER VE MODERN UYGULAMALAR

Elif AKTEPE¹

1. GİRİŞ

İnsan vücudu, yaşamın devamı için gerekli hayati işlevleri sürdürürken sürekli olarak elektriksel, mekanik ve kimyasal sinyaller üretmektedir. Bu fizyolojik sinyaller, vücudun işlevsel durumunu yansıtan ve çeşitli sensörler aracılığıyla ölçülüp kaydedilebilen biyolojik olarak anlamlı verilerdir. Kalbin kasılmaları sırasında ortaya çıkan elektriksel dalgalar, Elektrokardiyografi (EKG) ile kaydedilerek kalp ritmi, iletim durumu ve olası kas hasarları hakkında bilgi sağlar; aritmiler ve miyokard iskemisi gibi rahatsızlıkların teşhisinde yaygın olarak kullanılır. EKG sinyalinin analizi ve yorumlanması, tıbbi teşhis, sağlık takibi ve tedavi süreçlerinde önemlidir (Shen et al., 2025). Fizyolojik sinyallerin sürekli ve klinik dışı ortamlarda izlenmesine yönelik ihtiyaç, taşınabilir ve gerçek zamanlı veri toplayabilen sistemlerin gelişimini hızlandırmıştır. Son on yılda gelişen giyilebilir elektronik sistemler sayesinde artık bu sinyaller günlük yaşamda da izlenebilir hale gelmiştir. Akıllı saatler, bileklikler, esnek yamalar veya tekstil tabanlı sensörler hem kişisel sağlık takibine hem de koruyucu hekimliğe katkı sunmaktadır (Vo & Trinh, 2024). Sağlık izleme amacıyla kullanılan giyilebilir sistemler, vücuda takılabilen veya implante edilebilen minyatürize sensörler içermektedir. Bu biyosensörler;

¹ Öğretim Görevlisi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyon MYO, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, ORCID: 0000-0002-2375-2040.

kalp atış hızı, kan basıncı, vücut ve cilt sıcaklığı, oksijen satürasyonu, solunum hızı ve elektrokardiyografi gibi temel fizyolojik parametreleri ölçebilmektedir. Sensörlerden elde edilen veriler, kablolu veya kablosuz iletişim yöntemleriyle kişisel dijital asistan veya mikrodenetleyici tabanlı bir platforma aktarılmakta ve kullanıcı arayüzünde görüntülenebilmekte veya sağlık merkezlerine iletilebilmektedir. Giyilebilir tıbbi sistemler; sensörler, akıllı tekstiller, güç kaynakları, kablosuz iletişim modülleri, kontrol birimleri, kullanıcı arayüzü ve veri analiz algoritmalarından oluşan çok bileşenli bir mimariye sahiptir. Bu yapı, gerçek zamanlı sağlık takibini ve uzaktan sağlık hizmetlerini mümkün kılmaktadır (Pantelopoulos & Bourbakis, 2010; Pillai et al., 2022). Bu gelişmeler, fizyolojik sinyallerin yalnızca ölçülmesini değil, aynı zamanda anlamlandırılmasını ve karar destek sistemlerinde kullanılmasını da mümkün kılmıştır.

Son yıllarda, yapay zekâ destekli analiz yöntemlerinin yaygınlaşması ile EKG başta olmak üzere birçok fizyolojik sinyalin yorumlanmasında doğruluk ve hız önemli ölçüde artmıştır. Böylece EKG, yalnızca bir tanı aracı olmaktan çıkarak sürekli sağlık takibi ve erken uyarı sistemlerinin temel bileşeni haline gelmiştir. Bu doğrultuda, giyilebilir EKG cihazları ve Nesnelerin İnterneti (Internet of Things–IoT) tabanlı sağlık izleme platformları, klinik değerlendirmeyi tamamlayan, kişiselleştirilmiş ve kesintisiz bir izleme yaklaşımını mümkün kılmaktadır.

Bu bölümde, fizyolojik sinyal izleyiciler kapsamında EKG'nin temel prensipleri, kullanılan sensör teknolojileri ve EKG'nin çalışma mantığı ele alınacaktır. Ayrıca, IoT tabanlı, mobil ve giyilebilir EKG sistemleri incelenerek mevcut uygulamaların karşılaştığı teknik zorluklar ve gelecekteki gelişim potansiyelleri değerlendirilecektir. Bölümün genel amacı, okuyucuya hem EKG'nin temel fizyolojik ve teknolojik arka planını sunmak hem de modern uygulamalarla birlikte EKG'nin

dijital sağlık ekosistemindeki dönüşümünü kapsamlı bir bakış açısıyla aktarmaktır.

2. ÇALIŞMANIN İÇERİĞİ

Bu çalışmanın içeriği, EKG sinyalinin temel prensipleri, tarihçesi ve kalbin elektriksel aktivitesinin gövde yüzeyine nasıl yansıdığına ilişkin temel mekanizmaların ayrıntılı şekilde açıklanmasını kapsamaktadır. Ardından, EKG ölçümlerinde kullanılan sensör teknolojileri incelenmiş; Ag/AgCl elektrotlar, kuru elektrotlar, tekstil tabanlı elektrotlar ve optik sensörler gibi modern ölçüm araçlarının avantajları ve sınırlılıkları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Son bölümde ise günümüzde EKG'nin hem klinik hem de günlük yaşam uygulamaları ele alınmış; IoT tabanlı izleme sistemleri, mobil sağlık çözümleri ve yapay zekâ destekli analiz yöntemleri üzerinden modern EKG uygulamalarının sunduğu fırsatlar ile bu uygulamaların karşılaştığı teknik zorluklar analitik bir bakış açısıyla incelenmiştir.

Bu çerçevede çalışma, hem EKG'nin temel prensiplerini anlaşılır biçimde ortaya koymayı hem de güncel teknolojik gelişmeler ışığında modern EKG uygulamalarına bütüncül bir perspektif sunmayı amaçlamaktadır.

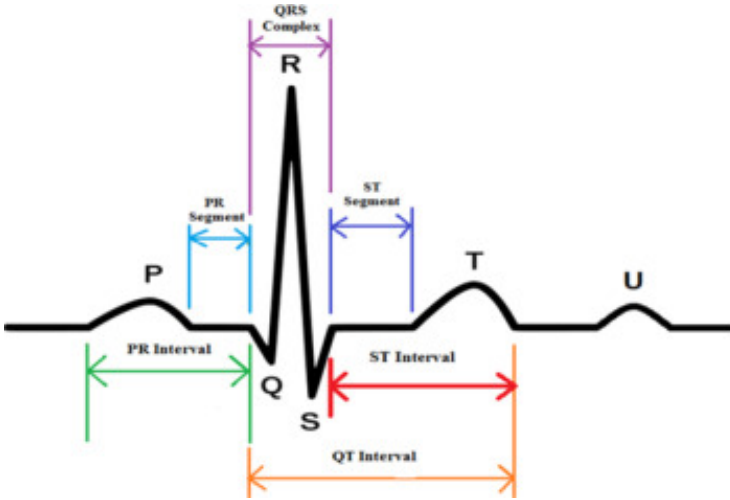
2.1. EKG'nin Temel Prensibi

EKG ilk kez 1903 yılında Willem Einthoven tarafından geliştirilmiş ve Einthoven, bu çalışması nedeniyle 1924 yılında Nobel Tıp Ödülü'ne layık görülmüştür. Einthoven'in geliştirdiği ipli galvanometre ve üç derivasyonlu kayıt tekniği (Einthoven, 1903), günümüzde hâlâ kullanılan EKG ölçüm sistemlerinin temelini oluşturmaktadır. Bu çalışma, kardiyak elektriksel aktivitenin vücut yüzeyinden güvenilir şekilde

kaydedilebileceğini göstererek elektrofizyoloji alanında yeni bir dönemin başlamasına öncülük etmiştir.

Kalbin elektriksel aktivitesi, kardiyak hücrelerdeki iyon hareketlerine bağlı olarak ortaya çıkan depolarizasyon ve repolarizasyon olaylarının sonucudur. Sinoatriyal (SA) düğümde kendiliğinden başlayan elektriksel impuls, atriyumlara ve ardından atriyoventriküler (AV) düğümden geçerek His-Purkinje sistemi boyunca ventriküllere yayılır. Bu iyonik akımlar, vücudun hacim iletken özellikleri nedeniyle gövde yüzeyine kadar ulaşır ve elektrotlar tarafından ölçülebilir hale gelir.

EKG sinyali, kalpteki bu aktivitenin gövde yüzeyinde oluşan potansiyel farklarının zamanla değişimini yansıtır. P dalgası atriyal depolarizasyonu, QRS kompleksi ventriküler depolarizasyonu ve T dalgası ventriküler repolarizasyonu temsil eder (Şekil 1). Her bir dalga ve segment, kardiyak siklusun belirli bir fizyolojik aşamasını ifade ettiği için tanısal açıdan yüksek özgüllük taşır.



Şekil 1. EKG morfolojisi: normal bir kişi için EKG sinyalinin farklı segmentleri (Sinha, 2012)

Einthoven, kalpte oluşan elektriksel aktivitenin vücut yüzeyinde bir vektörel elektrik alan oluşturduğunu ve bu alanın üç ekstremite elektrotu ile tanımlanabileceğini göstermiştir. Einthoven üçgeni olarak bilinen bu kavramsal model, ekstremite derivasyonlarının (I, II, III) kaynağını oluşturur ve kalbin elektriksel ekseninin belirlenmesi için temel teşkil eder.

EKG, 20. yüzyılın başından beri kardiyojinin temel tanısal aracıdır. Günümüzde, acilden yoğun bakıma, poliklinikten ev içi izleme çözümlerine kadar hemen her yerde kullanılmaktadır. Kayıtların güvenilirliği, doğru elektrot yerleşimi, yeterli cilt hazırlığı ve uygun filtreleme-örnekleme ayarlarına bağlıdır. Klinik standartlar, bu teknik ayrıntıları ayrıntılı biçimde tarif eder (Kligfield et al., 2007). EKG; aritmilerin tanısı, akut miyokard iskemisi/infarktüsü saptanması, iletim sistemi bozukluklarının ve elektrolit değişikliklerinin değerlendirilmesi için birinci basamak yöntemdir. Araştırma alanında, kalp hızı değişkenliği, otonom sinir sistemi ve egzersiz fizyolojisi çalışmalarında geniş bir kullanım alanı vardır. Son yıllarda, büyük veri tabanları ve giyilebilir cihazlarla uzun süreli ritim izlemi, topluluk düzeyinde tarama olanaklarını artırmıştır (Perez et al., 2019). P dalgası, QRS süresi, QT aralığı, PR aralığı ve ST segmenti gibi temel EKG parametreleri kardiyak fizyolojiyi ve patofizyolojiyi değerlendirmede önemlidir. Örneğin ST segmentindeki yükselme akut transmural iskemi lehine değerlendirilirken, QT aralığının uzaması proaritmik risk göstergesi olabilir (Hurst, 1998). Klasik 12 derivasyonlu kayıt, dört ekstremite ve altı prekordiyal elektrotla yapılır (Butchy et al., 2023). Ambulatuvar kayıt, telemetri ve güncel giyilebilir tek/çok derivasyonlu yama çözümleri, klinik dışı ortamlarda da veri toplamayı mümkün kılmaktadır. Bu sistemler, kablosuz iletişim, yüksek hareket toleransı ve kullanıcı konforu sayesinde günümüzde kardiyak izlem teknolojilerinin önemli bir bileşeni hâline gelmiştir (Kim et al., 2023).

2.2. Sensör Teknolojileri

Fizyolojik sinyallerin kaydedilmesinde kullanılan sensörler, ölçümün doğruluğunu ve hasta konforunu doğrudan etkileyen en kritik bileşenlerdir. Tarihsel olarak biyopotansiyel kayıtları elektrotlar aracılığıyla elde edilmiş ve bu yaklaşım günümüzde de EKG ölçümlerinin temelini oluşturmaktadır. Elektrotlar, cilt ile cihaz arasında elektriksel bir ara yüz oluşturarak iyonik akımların ölçülebilir elektriksel sinyallere dönüştürülmesini sağlar.

Klinik ortamlarda en yaygın kullanılan elektrot tipi gümüş/gümüş klorür (Ag/AgCl) elektrotlardır. Bu elektrotlar genellikle jel yardımıyla cilde yapıştırılır ve düşük giriş empedansı sayesinde yüksek kaliteli kayıt sağlar. Ancak uzun süreli uygulamalarda jel kuruyabildiği için sinyal kalitesinde düşüş meydana gelebilir ve ciltte iritasyon görülebilir (Chi et al., 2010). Bu nedenle jel tabanlı sistemlerin yerini alabilecek alternatif çözümler geliştirme ihtiyacı doğmuştur.

Bu dezavantajları gidermek amacıyla geliştirilen kuru elektrotlar, jel kullanılmadan doğrudan cilt ile temas ederek kayıt yapabilmektedir. Özellikle giyilebilir sistemlerde kuru elektrotlar, kullanım kolaylığı ve hijyen açısından avantaj sağlamaktadır. Ancak cilt-elektrot temasının değişkenliği nedeniyle temas empedansının zaman zaman artabilmesi, bu sistemlerin hâlen araştırılmakta olan zayıf yönlerinden biridir.

Son yıllarda üzerinde en çok çalışılan alanlardan biri de tekstil tabanlı elektrotlardır. İletken iplikler ya da polimerlerle kaplanmış kumaş yüzeyleri kullanılarak elde edilen bu sensörler, tişört veya bant gibi giysilere entegre edilebilmekte, böylece uzun süreli ve konforlu kullanım sağlamaktadır (Stoppa & Chiolerio, 2014). Ancak yıkama, terleme veya mekanik deformasyonlar bu elektrotların uzun dönem dayanıklılığını etkilemektedir. Bu

nedenle tekstil elektrotlarının yapısal dayanıklılığını artırmaya yönelik malzeme bilimi çalışmaları devam etmektedir.

Elektrot tabanlı ölçümlerin yanı sıra optik prensiplerle çalışan sensörler de oldukça yaygındır. Fotopletismografi (PPG) sensörleri, dokuya gönderilen ışığın kan damarlarından yansımaları ölçerek nabız ve oksijen saturasyonu hakkında bilgi sağlar. Bu yöntem, özellikle akıllı saat ve bilekliklerde kullanılarak günlük sağlık takibinde devrim yaratmıştır (Tamura et al., 2014). PPG sensörleri non-invaziv ve kolay uygulanabilir olmaları nedeniyle avantajlıdır; ancak hareket artefaktlarına karşı duyarlıdır. Bu nedenle modern cihazlarda gürültü azaltma algoritmaları ve çoklu dalga boyu LED sistemleri kullanılarak sinyal kalitesi iyileştirilmektedir.

Gelişmekte olan bir diğer alan ise esnek ve giyilebilir sensörlerdir. Nano-ölçekli iletken materyallerin veya esnek polimerlerin kullanıldığı bu sensörler, cilde yapışabilen ince yamalar şeklinde tasarlanmakta ve uzun süreli fizyolojik izleme için oldukça elverişli bulunmaktadır (Hammock et al., 2013). Bu sensörler, hem biyoyumlu olmaları hem de vücut hareketlerine uyum sağlayabilmeleri sayesinde geleneksel sert elektrotlara göre çok daha yüksek kullanıcı konforu sunmaktadır. Ayrıca, esnek elektronikler gelecekte tam entegre, kablosuz ve enerjiyi kendi üreten (self-powered) EKG sistemlerinin geliştirilmesine zemin hazırlamaktadır.

2.3. Modern Uygulamalar

Son yıllarda EKG teknolojisi yalnızca ritim ve ST-segment değişikliklerinin saptanmasında değil, aynı zamanda giyilebilir cihazlar, yapay zekâ destekli analizler ve uzaktan izleme sistemleri aracılığıyla kardiyak tanı ve izleme açısından köklü bir dönüşüm geçirmiştir. Güncel araştırmalarda sıklıkla kullanılan yapay zekânın bir alt dalı olan derin öğrenme, yalnızca EKG verilerinden, genellikle ekokardiyografi ile tespit edilen

asemptomatik sol ventrikül sistolik disfonksiyonu gibi kalp fonksiyon bozukluklarını tahmin edebilmektedir. Bu sayede, EKG yalnızca ritim analizi için değil, aynı zamanda hastaları tarama ve risk sınıflandırması amacıyla kullanma potansiyeli de kazanmıştır. Çok merkezli çalışmalarda, düşük ejeksiyon fraksiyonu (kalbin pompalama kapasitesinin bir göstergesi) tahmininde yüksek doğruluk oranları elde edilmiştir (Attia et al., 2019). Yakın gelecekte EKG; giyilebilir sensörler, ev tipi uzaktan izlem ve yapay zekâ destekli karar mekanizmaları ile kişiselleştirilmiş kardiyoloji uygulamalarının merkezinde yer alacaktır. Büyük ölçekli saha çalışmalarının açtığı yol, klinik değerlendirmeyi tamamlayan erken uyarı katmanları oluşturmaktadır (Perez et al., 2019).

Dahiya vd., yetişkinlerde kullanılan giyilebilir EKG teknolojilerini değerlendirdikleri kapsamlı bir derlemede, sensör doğruluğu, kullanıcı konforu ve veri bütünlüğü açısından önemli kıyaslamalar yapmışlardır (Dahiya et al., 2024). Kwon vd. ise tek kanallı EKG yama sistemlerini klasik telemetri cihazlarıyla karşılaştırarak, modern tek-derivasyonlu yamaların kısa süreli klinik izlemler için yeterli doğrulukta veri sağlayabildiğini göstermiştir (Kwon et al., 2024). Yapay zekâ destekli EKG analizinde, özellikle sinyal eksikliği veya sınırlı elektrot sayısına rağmen yüksek doğrulukta veri elde etmeye odaklanan çalışmalarda dikkat çekmektedir. Mason vd. yaptığı çalışmada yalnızca üç veya daha az elektrottan elde edilen sinyaller kullanılarak 12 derivasyonlu EKG'nin yeniden oluşturulması mümkün kılınmıştır (Mason et al., 2024). Benzer biçimde, Khunte vd., tek derivasyonlu EKG verilerinden sol ventrikül sistolik disfonksiyonunun tespitini sağlayan bir yapay zekâ modelinin yüksek doğrulukta sonuçlar ürettiğini bildirmiştir (Khunte et al., 2023). Tüketici elektroniği tabanlı EKG çözümleri de modern uygulamaların önemli bir bileşeni haline gelmiştir. Özellikle akıllı saatler aracılığıyla elde edilen kısa süreli EKG

verilerinin yapay zekâ modelleriyle analiz edilmesi, atriyal fibrilasyon gibi ritim bozukluklarının erken dönemde tespitine olanak sağlamaktadır. Papalamprakopoulou vd. yaptığı çalışmada, yapay zekâ destekli akıllı saat EKG'lerinin atriyal fibrilasyon tespitinde yüksek duyarlılığa sahip olduğu rapor edilmiştir (Papalamprakopoulou et al., 2024).

Aebisher vd. yapay zekâ algoritmalarının EKG'yi kullanarak sol ventrikül disfonksiyonu gibi yapısal kalp hastalıklarını saptayabileceğini göstermiştir (Aebisher et al., 2025). Ayrıca, giyilebilir tek-kanallı EKG cihazları ve makine öğrenmesi yöntemlerini birleştiren çalışmalar, EKG sinyalinden erken dönemde aritmi riskinin tahmin edilmesine olanak tanımaktadır (Alimbayeva et al., 2024). Derin öğrenme tekniklerinin EKG analizinde sistematik olarak incelendiği bir çalışma ise 198 makaleyi kapsayan veri üzerinden modellerin geleceğe dönük kullanım alanlarını haritalamıştır (Wu & Guo, 2025). Bunun yanı sıra, mobil EKG cihazlarının klinik ve ev kullanımı açısından teknolojik durumu ele alan literatür mobil sağlık trendlerini yansıtmaktadır (Echavarria et al., 2023). Giyilebilir cihazlar ve makine öğrenmesinin entegrasyonu, atriyal fibrilasyon başta olmak üzere kardiyovasküler patolojilerin uzaktan izlenmesi ve erken müdahalesi artık mümkün görünmektedir (Neri et al., 2023). Ayrıca, EKG sinyal işleme ve yapay zekâ destekli öznitelik çıkarımına odaklanan çalışmalar, syf-kalibrasyon ve gürültüden arındırma gibi ön adımlarla birlikte sınıflandırma doğruluğunu artırmakta (Sellés & Breyse, 2023). EKG'nin yalnızca elektriksel ritim bozukluklarını değil, aynı zamanda yapısal kalp hastalıkları, miyokard hasarı ve son-dönem kardiyak olay riskini de tahmin edebileceğini vurgulayan bir derleme ise teknolojik olgunlaşmanın adımlarını göstermektedir (Rafie et al., 2021). Giyilebilir EKG teknolojilerinin klinik pratiğe entegrasyonu ve geleceğe dönük potansiyeli üzerine yazılan Jena vd. yaptığı

çalışmada, bu alandaki uygulamaların çok yönlü olduğunu ortaya koymaktadır (Jena et al., 2025). Son olarak, mobil izleme sistemleri ve EKG ile veri toplama-analiz süreçlerini bütünleştiren ve uzaktan sağlık izleme açısından yenilikçi modelleri inceleyen Sana vd. çalışması, alanın dönüşümünü özetlemektedir (Sana et al., 2020). Bu yönelimler ışığında, EKG artık yalnızca tanı aracı olarak değil; kişiselleştirilmiş izleme, erken uyarı ve yapay zekâ destekli risk tahmini platformu olarak da rol oynamaktadır.

3. TARTIŞMA VE SONUÇ

EKG, kalbin elektriksel aktivitesini izleme ve yorumlama konusunda bir asırdan uzun süredir tıbbın en temel tanı araçlarından biridir. Ancak günümüzde bu klasik yöntem, sensör teknolojilerindeki yenilikler, kablosuz iletişim altyapısının gelişimi ve yapay zekâ destekli analiz yaklaşımları sayesinde geleneksel sınırlarının ötesine geçmiştir. Gelişmiş elektrot sistemleri, tekstil tabanlı çözümler ve optik sensörlerin ortaya çıkmasıyla EKG, klinik ortamlardan çıkarak giyilebilir, taşınabilir ve uzun süreli izleme sistemlerine başarıyla entegre edilmiştir. Bu dönüşüm hem bireyselleştirilmiş sağlık yönetimini güçlendirmekte hem de erken tanı ve müdahale süreçlerini daha etkin bir hâle getirmektedir.

Yapay zekâ ve derin öğrenme tabanlı modellerin, EKG sinyallerinden yalnızca aritmi veya iskemi gibi ritim bozukluklarını değil; aynı zamanda yapısal ve fonksiyonel kardiyak anomalileri de öngörebilmesi, kardiyolojik değerlendirmede yeni bir paradigma ortaya koymaktadır. IoT tabanlı izleme sistemleri ve mobil sağlık uygulamaları ise sürekli veri akışı sağlayarak hastaların gerçek zamanlı değerlendirilmesine ve uzaktan takip modellerinin yaygınlaşmasına önemli katkı sunmaktadır. Bu durum, kardiyak

izlem süreçlerini daha hızlı, daha erişilebilir ve daha veri odaklı hâle getirmiştir.

Gelecekte EKG teknolojisinin; biyouyumlu malzemeler, enerji verimli donanımlar, esnek elektronikler ve yüksek düzeyde güvenli veri işleme platformlarıyla birleşmesi beklenmektedir. Bu gelişmeler ışığında, EKG'nin yalnızca bir tanı aracı olmanın ötesine geçerek kapsamlı bir dijital sağlık çözümüne dönüşmesi olasıdır. Böyle bir yapıda klinik karar destek sistemleri daha etkin çalışacak, bireysel sağlık yönetimi güçlenecek ve toplum temelli kardiyak tarama programları daha erişilebilir hale gelecektir. Dolayısıyla EKG'nin evrimi, sadece teknolojik bir yenilik olarak değerlendirilmemeli; aynı zamanda modern dijital sağlık ekosisteminin merkezinde yer alan çok yönlü bir dönüşüm olarak ele alınmalıdır.

KAYNAKÇA

- Alimbayeva, Z., Alimbayev, C., Ozhikenov, K., Bayanbay, N., & Ozhikenova, A. (2024). Wearable ECG Device and Machine Learning for Heart Monitoring. *Sensors*, 24(13). doi:10.3390/s24134201
- Attia, Z. I., Kapa, S., Lopez-Jimenez, F., McKie, P. M., Ladewig, D. J., Satam, G., ... Friedman, P. A. (2019). Screening for cardiac contractile dysfunction using an artificial intelligence-enabled electrocardiogram. *Nature Medicine*, 25(1), 70–74. doi:10.1038/s41591-018-0240-2
- Bartusik-Aebisher, D., Rogóż, K., & Aebisher, D. (2025, July 1). Artificial Intelligence and ECG: A New Frontier in Cardiac Diagnostics and Prevention. *Biomedicines*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). doi:10.3390/biomedicines13071685
- Butchy, A. A., Jain, U., Leasure, M. T., Covalsky, V. A., & Mintz, G. S. (2023). Importance of Electrode Selection and Number in Reconstructing Standard Twelve Lead Electrocardiograms. *Biomedicines*, 11(6). doi:10.3390/biomedicines11061526
- Chi, Y. M., Jung, T. P., & Cauwenberghs, G. (2010). Dry-contact and noncontact biopotential electrodes: Methodological review. *IEEE Reviews in Biomedical Engineering*, 3, 106–119. doi:10.1109/RBME.2010.2084078
- Dahiya, E. S., Kalra, A. M., Lowe, A., & Anand, G. (2024, February 1). Wearable Technology for Monitoring Electrocardiograms (ECGs) in Adults: A Scoping Review. *Sensors*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). doi:10.3390/s24041318
- Einthoven, W. (1903). *Die galvanometrische Registrierung des menschlichen Elektrokardiogramms, zu-gleich eine*

Beurtheilung tier Anwendung des Capillar-Elektrometers in tier Physiologie). *Transactions of the Royal Soc. of London* (Vol. 180).

- Hammock, M. L., Chortos, A., Tee, B. C. K., Tok, J. B. H., & Bao, Z. (2013). 25th anniversary article: The evolution of electronic skin (E-Skin): A brief history, design considerations, and recent progress. *Advanced Materials*, 25(42), 5997–6038. doi:10.1002/adma.201302240
- Hurst, J. W. (1998). *Naming of the Waves in the ECG, With a Brief Account of Their Genesis*. Retrieved from <http://ahajournals.org>
- Jena, N., Singh, P., Chandramohan, D., Garapati, H. N., Gummadi, J., Mylavarapu, M., ... Simhadri, P. K. (2025, June 1). Wearable Technology in Cardiology: Advancements, Applications, and Future Prospects. *Reviews in Cardiovascular Medicine*. IMR Press Limited. doi:10.31083/RCM39025
- Khunte, A., Sangha, V., Oikonomou, E. K., Dhingra, L. S., Aminorroaya, A., Mortazavi, B. J., ... Khera, R. (2023). Detection of left ventricular systolic dysfunction from single-lead electrocardiography adapted for portable and wearable devices. *Npj Digital Medicine*, 6(1). doi:10.1038/s41746-023-00869-w
- Kim, J. Y., Oh, I. Y., Lee, H., Lee, J. H., Cho, Y., Gil, Y., ... Kwak, J. Y. (2023). The efficacy of detecting arrhythmia is higher with 7-day continuous electrocardiographic patch monitoring than with 24-h Holter monitoring. *Journal of Arrhythmia*, 39(3), 422–429. doi:10.1002/joa3.12865
- Kligfield, P., Gettes, L. S., Bailey, J. J., Childers, R., Deal, B. J., Hancock, E. W., ... Wagner, G. S. (2007, March 13).

- Recommendations for the Standardization and Interpretation of the Electrocardiogram. *Journal of the American College of Cardiology*. doi:10.1016/j.jacc.2007.01.024
- Kwon, S., Choi, E. K., Lee, S. R., Oh, S., Song, H. S., Lee, Y. S., ... Lim, H. E. (2024). Comparison of Novel Telemonitoring System Using the Single-lead Electrocardiogram Patch With Conventional Telemetry System. *Korean Circulation Journal*, 54(3), 140–153. doi:10.4070/kcj.2023.0252
- Martínez-Sellés, M., & Marina-Breyse, M. (2023, April 1). Current and Future Use of Artificial Intelligence in Electrocardiography. *Journal of Cardiovascular Development and Disease*. MDPI. doi:10.3390/jcdd10040175
- Mason, F., Pandey, A. C., Gadaleta, M., Topol, E. J., Muse, E. D., & Quer, G. (2024). AI-enhanced reconstruction of the 12-lead electrocardiogram via 3-leads with accurate clinical assessment. *Npj Digital Medicine*, 7(1). doi:10.1038/s41746-024-01193-7
- Neri, L., Oberdier, M. T., van Abeelen, K. C. J., Menghini, L., Tumarkin, E., Tripathi, H., ... Halperin, H. R. (2023, May 1). Electrocardiogram Monitoring Wearable Devices and Artificial-Intelligence-Enabled Diagnostic Capabilities: A Review. *Sensors*. MDPI. doi:10.3390/s23104805
- Pantelopoulous, A., & Bourbakis, N. G. (2010). A survey on wearable sensor-based systems for health monitoring and prognosis. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics Part C: Applications and Reviews*. doi:10.1109/TSMCC.2009.2032660

- Papalamprakopoulou, Z., Stavropoulos, D., Moustakidis, S., Avgerinos, D., Efremidis, M., & Kampaktsis, P. N. (2024). Artificial intelligence-enabled atrial fibrillation detection using smartwatches: current status and future perspectives. *Frontiers in Cardiovascular Medicine*. Frontiers Media SA. doi:10.3389/fcvm.2024.1432876
- Perez, M. V., Mahaffey, K. W., Hedlin, H., Rumsfeld, J. S., Garcia, A., Ferris, T., ... Turakhia, M. P. (2019). Large-Scale Assessment of a Smartwatch to Identify Atrial Fibrillation. *New England Journal of Medicine*, 381(20), 1909–1917. doi:10.1056/nejmoa1901183
- Pillai, S., Upadhyay, A., Sayson, D., Nguyen, B. H., & Tran, S. D. (2022, January 1). Advances in medical wearable biosensors: Design, fabrication and materials strategies in healthcare monitoring. *Molecules*. MDPI. doi:10.3390/molecules27010165
- Rafie, N., Kashou, A. H., & Noseworthy, P. A. (2021). ECG Interpretation: Clinical Relevance, Challenges, and Advances. *Hearts*, 2(4), 505–513. doi:10.3390/hearts2040039
- Sana, F., Isselbacher, E. M., Singh, J. P., Heist, E. K., Pathik, B., & Armoundas, A. A. (2020, April 7). Wearable Devices for Ambulatory Cardiac Monitoring: JACC State-of-the-Art Review. *Journal of the American College of Cardiology*. Elsevier USA. doi:10.1016/j.jacc.2020.01.046
- Shen, J., Wu, J., Liang, H., Zhao, Z., Li, K., Zhu, K., ... Hu, B. (2025). Physiological signal analysis using explainable artificial intelligence: A systematic review. *Neurocomputing*, 618. doi:10.1016/j.neucom.2024.128920

- Sinha, R. (2012). *An Approach for Classifying ECG Arrhythmia based on Features Extracted from EMD and Wavelet Packet Domains* (Ph.D Thesis).
- Stoppa, M., & Chiolerio, A. (2014, July 7). Wearable electronics and smart textiles: A critical review. *Sensors (Switzerland)*. MDPI AG. doi:10.3390/s140711957
- Tamura, T., Maeda, Y., Sekine, M., & Yoshida, M. (2014, April 23). Wearable photoplethysmographic sensors—past and present. *Electronics* . MDPI AG. doi:10.3390/electronics3020282
- Vo, D. K., & Trinh, K. T. L. (2024, November 1). Advances in Wearable Biosensors for Healthcare: Current Trends, Applications, and Future Perspectives. *Biosensors*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). doi:10.3390/bios14110560
- Wu, Z., & Guo, C. (2025, December 1). Deep learning and electrocardiography: systematic review of current techniques in cardiovascular disease diagnosis and management. *BioMedical Engineering Online*. BioMed Central Ltd. doi:10.1186/s12938-025-01349-w
- Zepeda-Echavarria, A., de van Leur, R. R. van, van Sleuwen, M., Hassink, R. J., Wildbergh, T. X., Doevendans, P. A., ... van Es, R. (2023). Electrocardiogram Devices for Home Use: Technological and Clinical Scoping Review. *JMIR Cardio*. JMIR Publications Inc. doi:10.2196/44003

BİYOYAZICILARDA YAPAY ZEKÂNIN ETKİSİ

Aysu AKILLI ARI¹

1. GİRİŞ

Biyoteknoloji, doku mühendisliği ve yapay zekâ alanlarında son yıllarda kaydedilen ilerlemeler, modern tıp uygulamalarının niteliğini köklü biçimde değiştirmektedir [1,2]. Bu dönüşümün merkezinde yer alan üç boyutlu biyoyazıcı teknolojileri (3D bioprinting), canlı hücreler ve biyoyumlu malzemeler kullanarak doku benzeri yapılar üretme kapasitesi sayesinde rejeneratif tıp, ilaç geliştirme ve hastaya özel tedavi yaklaşımlarında devrim niteliğinde yenilikler sunmaktadır [1].

Biyoyazım süreci; hücre yoğunluğu, biyomürekkep reolojisi, sıcaklık kontrolü, baskı hızı, nozul çapı, çapraz bağlanma dinamikleri ve post-proses kültür koşulları gibi çok sayıda parametreye aynı anda bağlı olarak yürütülen karmaşık bir süreçtir [3]. Bu ölçekte bir parametre yoğunluğunun manuel olarak yönetilmesi çoğu zaman deneysel hatalara, düşük tekrarlanabilirliğe ve zaman kaybına yol açmaktadır.

Bu nokta, yapay zekâ (YZ) sistemlerinin biyoyazıcı teknolojilerinde neden kritik bir rol üstlendiğini açıklamaktadır. Makine öğrenimi (ML), derin öğrenme (DL) ve veri odaklı optimizasyon algoritmaları; hem baskı öncesi tasarım süreçlerini hem de baskı esnasındaki dinamik kontrol mekanizmalarını otomatikleştirerek daha yüksek doğruluk, hız ve standardizasyon sağlamaktadır [2,4,5].

¹ Dr. Öğr. Üyesi Aysu AKILLI ARI, Amasya Üniversitesi Merzifon MYO, Makine ve Metal Teknolojisi, ORCID: 0000-0002-1252-9417.

Bu kitap bölümü, yapay zekânın biyoyazıcılara entegrasyonunu teknik, bilimsel ve etik boyutlarıyla kapsamlı şekilde ele almakta; güncel literatür ışığında teknolojinin gelişim yönlerini değerlendirmektedir.

2. BİYOYAZICI TEKNOLOJİSİNİN TEMELLERİ

2.1. Bileşenler

Biyoyazıcı sistemler, hücresel yapılardan fonksiyonel doku ve organ benzeri yapılar üretmeyi amaçlayan karmaşık biyomühendislik platformlarıdır. Bir biyoyazıcının çalışma prensibi, malzemenin fiziksel özellikleri, yazdırma mekanizması ve baskı sonrası kültür ortamının sağladığı biyolojik destek arasında hassas bir uyuma dayanır. Bu nedenle sistem üç temel bileşen üzerinden değerlendirilir: biyomürekkep, yazdırma mekanizması ve post-proses ortamı. Her bir bileşen, üretilen dokunun mekanik bütünlüğünü, mikro-mimarisini ve hücre canlılığını belirleyen kritik bir rol oynar.

2.1.1. Biyomürekkep

Biyomürekkepler, hücrelerin baskı sırasında ve sonrasında hayatta kalabilmesini sağlayan biyoyumlu taşıyıcı materyallerden oluşur. Bu malzemeler, doğal polimerler (alginat, fibrin, kolajen), yarı sentetik türevler (jelatin metakrilat – GelMA) ve mineral içerikli seramik partiküller (hidroksiapatit, β -TCP) gibi farklı biyomalzemelerden oluşabilir [7].

Biyomürekkebin bileşimi, reolojik davranış (akışkanlık–viskozite ilişkisi), biyomekanik dayanım, çapraz bağlanma kapasitesi ve hücrelerin mikroçevre ile etkileşimini doğrudan etkiler. Ayrıca büyüme faktörleri ve besleyici ortamların eklenmesi, hücre proliferasyonunun artırılması açısından önemlidir. İdeal bir biyomürekkep, baskı sürecine uygun viskoziteye sahip olmalı, hücrelere zarar vermeyecek akış

koşulları sağlamalı ve baskı sonrası hızla stabil bir yapı oluşturmalıdır.

2.1.2. Yazdırma Mekanizması

Biyoyazıcılar, kullanılan teknolojiye göre farklı baskı prensipleri üzerinden çalışır.

Ekstrüzyon temelli sistemler, yüksek viskoziteli biyomürekkeplerin sürekli akışla nozül üzerinden dışarı verilmesini sağlar ve özellikle hücre yoğunluğu yüksek yapılar için tercih edilir.

Damla bazlı inkjet yazıcılar, düşük viskoziteli mürekkeplerle yüksek çözünürlük sunarken hücreler üzerinde daha düşük mekanik stres yaratır.

Lazer destekli biyoyazım (LAB), yüksek hassasiyetli bir teknik olup hücreleri temas olmadan aktarması sayesinde canlılığı korur.

Mikrovalf veya elektrohidrodinamik sistemler ise akış hızını ve damlacık oluşumunu daha kontrollü yöneterek karmaşık mikro-mimarilerin üretimine imkân tanır [1].

Bu yöntemler ile kullanılan mekanizma, baskı çözünürlüğünü, hücrelerin maruz kaldığı stresi ve elde edilen yapının mekanik bütünlüğünü doğrudan belirler.

2.1.3. Yazdırma Ortamı ve Post-Proses

Baskı işlemi tamamlandıktan sonra üretilen yapının biyolojik olarak işlev kazanması için uygun kültür koşullarına sahip bir ortama aktarılması gerekir.

Kuluçka (inkübasyon) parametreleri sıcaklık, CO₂ oranı, nem dengesi hücrelerin canlılığını sürdürmesi için kritik öneme sahiptir. Bunun yanında çapraz bağlayıcı ajanlar (örneğin CaCl₂ veya UV ışığı), biyomürekkebin fiziksel olarak stabil hale gelmesini sağlar ve yapı bütünlüğünü artırır.

Biyoreaktör sistemleri ise mekanik uyarı, besin akışı ve oksijen transferinin optimize edildiği dinamik bir kültür ortamı sunarak dokunun fonksiyonel özelliklerini geliştirmeye yardımcı olur [7]. Bu aşama, basılan dokunun mekanik dayanım, matris üretimi ve hücresel fonksiyon açısından olgunlaşmasında belirleyici bir süreçtir.

2.2. Parametre Yoğunluğu

Biyoyazım süreci, çok sayıda fiziksel ve biyolojik parametrenin eş zamanlı kontrolünü gerektiren son derece karmaşık bir üretim işlemidir.

Biyomürekkebin viskozitesi, malzemenin akış davranışını ve baskı sırasında uygulanması gereken basınç değerini belirler.

Sıcaklık ve nem gibi çevresel koşullar, hem mürekkebin stabilitesini hem de hücre canlılığını etkiler.

Nozul basıncı ve baskı hızı, katmanların düzgün bir şekilde oluşturulması için kritik öneme sahiptir.

Tabaka yüksekliği, yapıdaki gözenek oranını ve mekanik dayanımı etkilerken çapraz bağlanma süresi final yapının stabilitesini belirler. Hücre yoğunluğu ve dağılımı ise dokunun biyolojik işlevselliğini doğrudan etkiler.

Bu parametreler arasındaki ilişki lineer değildir; çoğu zaman karmaşık, çok değişkenli bir etkileşim ağı söz konusudur. DeneySEL olarak tüm kombinasyonları test etmek hem zaman hem de maliyet açısından mümkün değildir. Bu nedenle makine öğrenimi ve derin öğrenme gibi yapay zekâ yöntemleri, parametreler arasındaki ilişkileri öğrenmek ve optimum baskı koşullarını modellemek için giderek daha fazla kullanılmaktadır. YZ modelleri, geniş veri setleri üzerinden öğrenerek hem baskı kalitesini artırmakta hem de deneme-yanılma gereksinimini önemli ölçüde azaltmaktadır [4,5].

3. YAPAY ZEKÂNIN BİYOYAZICILARA ENTEGRASYONU

Yapay zekâ, biyoyazıcı sistemlerinin hem donanım hem de yazılım bileşenlerine entegre edilerek sistemleri “akıllı”, “öğrenebilir” ve “öngörücü” hâle getirmektedir [2,4].

Tasarım ve modelleme aşamalarında YZ, MRI veya CT gibi tıbbi görüntü verilerini otomatik olarak segmentleyerek, hastaya özel doku ve organ geometrilerinin yüksek doğrulukla yeniden inşa edilmesini sağlar. Bu süreçte Generative Adversarial Networks (GAN) gibi derin öğrenme tabanlı modeller, eksik doku bölgelerinin sentetik olarak tamamlanmasına ve CAD tabanlı scaffold tasarımlarının duvar kalınlığı, gözeneklilik ve mikromimari parametrelerinin otomatik optimizasyonuna imkân tanır. Örneğin, 2023 yılında yayımlanan bir çalışmada ResNet tabanlı segmentasyon modellerinin karaciğer loblarının 3D rekonstrüksiyonunda manuel segmentasyona kıyasla %30 daha yüksek doğruluk sağladığı bildirilmiştir [5].

Biyomürekkep optimizasyonunda ise makine öğrenimi algoritmaları, farklı biyomürekkep karışımlarının reolojik özelliklerini, mekanik dayanımını, baskı kalitesini ve hücre canlılığını önceden tahmin ederek çok bileşenli sistemlerde deneysel yükü azaltmaktadır [7]. Bu sayede hem malzeme israfı önlenmekte hem de baskı süreci daha verimli hâle gelmektedir. Baskı aşamasında YZ tabanlı akıllı kontrol sistemleri, nozul tıkanması, tabaka bozulması, malzeme akışındaki düzensizlik ve sıcaklık dalgalanmaları gibi hataları gerçek zamanlı olarak tespit edebilmekte ve bazı sistemlerde derin öğrenme destekli geri besleme algoritmaları sayesinde baskı hızını anlık olarak ayarlayarak kaliteyi optimize edebilmektedir [8]. Bu bütünleşik yaklaşım, biyoyazıcılarda üretim doğruluğunu artırmakta, hücre canlılığını korumakta ve tekrarlanabilirliği yükseltmektedir.

4. MAKİNE ÖĞRENİMİ VE DERİN ÖĞRENMENİN BİYORYAZIMDAKİ ROLÜ

Makine öğrenimi ve derin öğrenme teknikleri, biyoyazıcı süreçlerinde parametre optimizasyonu, kalite kontrol ve hücre canlılığının tahmini gibi kritik alanlarda giderek daha fazla kullanılmaktadır.

Makine öğrenimi, baskı parametreleri ile çıktı verileri arasındaki ilişkileri modelleyerek sürecin doğruluk ve verimliliğini artırır. Örneğin, Random Forest algoritmaları, farklı baskı parametrelerinin baskı kalitesi ve hücre canlılığı üzerindeki önemini analiz etmekte yaygın olarak kullanılmaktadır. Destek Vektör Makineleri, biyomürekkep davranışlarını sınıflandırarak uygun baskı koşullarını öngörmekte yüksek başarı sağlamaktadır. Ayrıca çoklu regresyon modelleri, viskozite, baskı basıncı ve hız gibi değişkenler arasındaki doğrusal ve doğrusal olmayan ilişkileri istatistiksel olarak modelleyerek süreç optimizasyonuna katkı sunar. 2021 yılında yayımlanan bir çalışmada, Random Forest modelinin baskı parametrelerinden hücre canlılığını %85 doğrulukla öngörebildiği bildirilmiştir [4,7]. Bu tür yaklaşımlar, deneysel deneme-yanılma süreçlerinin süresini ve maliyetini önemli ölçüde azaltmaktadır.

Derin öğrenme yaklaşımları, biyoyazım sürecinde daha karmaşık veri yapılarını analiz etmek için kullanılır. Evrişimli sinir ağları (CNN'ler), mikro-yapısal bozukluklar gibi gözlemesi zor problemleri tespit edebilirken, uzun kısa süreli bellek (LSTM) ağları, baskı sürecindeki zaman serisi verilerini analiz ederek sıcaklık, basınç ve akış parametrelerinin dinamik etkilerini öngörebilmektedir. Autoencoder modelleri ise biyomürekkep reolojisini düşük boyutlu temsillere indirger ve bu sayede optimizasyon süreçlerinde veri boyutunu ve hesaplama yükünü azaltır [5]. Bu yöntemler, baskı sürecinin hem gerçek zamanlı

kontrolünü hem de kalite güvence mekanizmalarını güçlendirmekte, hücre canlılığının korunmasını sağlamaktadır.

5. VERİ ODAKLI YAKLAŞIMLAR: DİJİTAL İKİZ KONSEPTİ

Dijital ikiz (Digital Twin) teknolojisi, biyoyazıcı sistemlerinin ve baskı süreçlerinin sanal bir kopyasının oluşturulmasına dayanır. Bu yaklaşım, fiziksel sistemdeki değişkenlerin dijital ortamda modellenmesini ve simülasyonunu mümkün kılarak sürecin dinamik olarak analiz edilmesine imkân verir. Dijital ikizler sayesinde parametre kombinasyonları sanal ortamda test edilerek optimum baskı koşulları belirlenebilir, malzeme sarfıyatı minimuma indirilebilir ve deneysel tekrar sayısı azaltılabilir. Ayrıca biyomürekkep davranışları ve hücre tepkileri önceden tahmin edilebildiği için biyoyazım süreçlerinin planlanması daha güvenli ve maliyet etkin hâle gelir. 2024 yılında yayımlanan bir çalışmada, dijital ikiz tabanlı biyoyazım optimizasyonunun deneysel maliyeti %40 oranında düşürdüğü ve süreç verimliliğini belirgin şekilde artırdığı rapor edilmiştir [6].

Dijital ikiz yaklaşımı, özellikle çok parametrelili ve yüksek maliyetli hücre kültürlerinde, biyoyazımın hem doğruluk hem de tekrarlanabilirlik açısından performansını artırmaktadır. Ayrıca bu sistem, YZ tabanlı parametre optimizasyonu ve makine öğrenimi algoritmaları ile entegre edildiğinde, baskı sürecinin otonom yönetimine zemin hazırlar. Bu sayede, gerçek zamanlı veri akışı ile sanal model arasındaki geri besleme döngüsü sayesinde süreç kontrolü sürekli iyileştirilir ve laboratuvar ortamında üretilen dokuların klinik uygulanabilirliği artırılır.

6. YAPAY ZEKA DESTEKLİ BİYOYAZICILARIN UYGULAMA ALANLARI

6.1. Rejeneratif Tıp

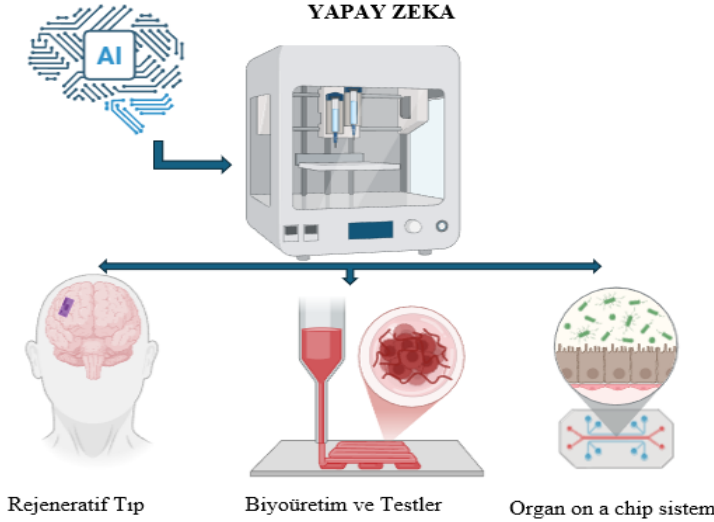
YZ entegrasyonlu biyoyazım sistemleri, rejeneratif tıp uygulamalarında hücresel davranışların daha iyi anlaşılmasını ve baskı parametrelerinin biyolojik gereksinimlere göre hassas biçimde optimize edilmesini sağlamaktadır. Özellikle kırık ve kemik gibi yüksek mekanik dayanım gerektiren dokuların üretiminde, yapay zekâ modelleri biyomürekkebin reolojik profilini, baskı hızı–basınç ilişkisini ve çapraz bağlanma sürelerini analiz ederek optimal koşulları belirlemektedir. Böylece elde edilen yapılar, hem mikro-mimari bütünlük hem de hücre canlılığı açısından daha yüksek kalitede olmaktadır. Ayrıca vasküler doku ve kardiyak yama üretiminde derin öğrenme tabanlı görüntüleme algoritmaları, doku içi porozite ve damar ağlarının geometrisini iyileştirerek daha fizyolojik modeller ortaya çıkarmaktadır [7].

6.2. İlaç Testi ve Toksisite Analizi

İlaç geliştirme süreçlerinde biyoyazılmış mikro-dokuların kullanımı, hem deney maliyetlerini düşürmekte hem de hayvan deneylerine olan gereksinimi azaltmaktadır. YZ modelleri bu platformlara entegre edildiğinde, hücresel yanıtların yüksek doğrulukla sınıflandırılması, toksik etkilerin erken evrelerde tahmin edilmesi ve aday bileşiklerin risk analizlerinin daha kısa sürede yapılması mümkün hale gelmektedir. Özellikle makine öğrenimi tabanlı karar destek sistemleri, farklı dozaj seviyelerinde hücresel stres belirteçlerinin değişimini analiz ederek araştırmacılara güvenilir doz–yanıt eğrileri sunmaktadır. Bu yaklaşım, ilaç tarama süreçlerinde hem hız hem de hassasiyet sağlayan yeni nesil bir paradigma oluşturmaktadır [9].

6.3. Organ-on-a-Chip Sistemleri

Organ-on-a-chip platformları, mikroakışkan kanallar içerisinde hücresel etkileşimleri taklit eden gelişmiş biyomühendislik sistemleridir. Yapay zekâ entegrasyonu sayesinde bu sistemlerdeki akış dinamikleri daha detaylı şekilde modellenebilmekte, hücre davranışları çok boyutlu veri setleriyle değerlendirilebilmekte ve çip mimarisi deneysel sonuçlara göre optimize edilebilmektedir. Derin öğrenme tabanlı akış simülasyonları, besin ve oksijen dağılımını hassas biçimde hesaplayarak hücrelerin fizyolojik koşullara en benzer ortamda tutulmasını sağlar. YZ'nin çip tasarımına entegre edilmesi, deneysel doğruluğu artıran, daha gerçekçi insan-fizyolojisi modelleri üreten yeni nesil organ-on-a-chip teknolojilerinin gelişimine önemli katkılar sunmaktadır [9].



Şekil 1. Yapay Zeka Destekli Biyoyazıcıların Uygulama Alanları.

7. ETİK, VERİ GÜVENLİĞİ VE DÜZENLEYİCİ SÜREÇLER

Biyoyazıcılarda yapay zekâ (YZ) kullanımının yaygınlaşması, yalnızca teknik ve bilimsel ilerlemeleri değil, aynı zamanda etik, veri güvenliği ve düzenleyici çerçeveleri de zorlayıcı bir şekilde gündeme getirmektedir [2]. Öncelikle, hasta verilerinin gizliliği önemli bir sorun olarak öne çıkar. Biyoyazımda, hastaya özel organ ve doku modelleri oluşturulurken genellikle MRI, CT veya genetik veriler kullanılır. Bu verilerin anonimleştirilmeden veya yeterince güvenli bir şekilde işlenmemesi, kişisel sağlık bilgilerinin sızması riskini artırır ve etik ihlallere yol açabilir.

İkinci olarak, otonom sistemlerde sorumluluk paylaşımı belirsizliğe neden olabilir. YZ destekli biyoyazıcılar, baskı sürecinde bağımsız kararlar alabilmekte ve hataları otomatik olarak düzeltebilmektedir. Ancak bu sistemlerde üretim hatası, hücre canlılığının düşmesi veya biyomalzeme uyumsuzluğu gibi sorunlar ortaya çıktığında, sorumluluğun kimde olduğu net değildir: yazılım geliştiricisi, klinik kullanıcı veya biyoyazıcı üreticisi mi sorumlu tutulacaktır? Bu, uluslararası düzenleyici standartlarda hâlen çözülmesi gereken kritik bir konudur.

Üçüncü olarak, YZ kararlarının açıklanabilirliği (explainability) etik ve klinik güvenlik açısından önemlidir. Derin öğrenme ve makine öğrenimi modelleri genellikle “kara kutu” mantığında çalışır; yani modelin neden belirli bir parametreyi önerdiği veya baskıyı belirli bir şekilde optimize ettiği tam olarak anlaşılamayabilir. Klinik uygulamalarda, özellikle hastaya özel tedavilerde, bu açıklanabilirlik eksikliği güvenlik endişeleri ve etik sorumluluk problemleri yaratır.

Dördüncü olarak, biyolojik yapıların standartlaştırılması ve kalite kontrolü gerekliliği ortaya çıkar. Farklı laboratuvarlar ve biyoyazıcı platformları arasında üretim süreçleri ve

biyomürekkep formülasyonları değişkenlik gösterebilir. Bu durum, klinik uygulanabilirlik ve karşılaştırılabilirlik açısından sorunlar yaratır. YZ sistemleri, süreç optimizasyonunda önemli bir araç olsa da, standardizasyonun sağlanması hâlen insan gözetimi ve uluslararası protokoller gerektirir.

Regülasyon açısından, FDA (Amerikan Gıda ve İlaç Dairesi) ve EMA (Avrupa İlaç Ajansı) gibi kuruluşlar, YZ tabanlı biyomalzeme üretimi ve biyoyazım süreçlerini düzenlemek için aktif çalışmalar yürütmektedir. Bu düzenlemeler, hem teknik güvenliği hem de etik uyumluluğu sağlamaya yöneliktir. Ancak YZ tabanlı biyomalzeme optimizasyonu hâlen erken aşamada olup, klinik onay süreçlerinde ek doğrulama ve uzun dönem güvenlik verileri gerektirmektedir [2]. Bu nedenle, biyoyazıcı teknolojilerinin klinik kullanıma geçişinde etik rehberler, veri güvenliği protokolleri ve standart çalışma prosedürlerinin eş zamanlı olarak geliştirilmesi büyük önem taşır.

Gelecekte, yapay zekâ destekli biyoyazıcılar için etik ve düzenleyici çerçevelerin daha bütüncül ve uluslararası standartlarla desteklenmesi beklenmektedir. Bu çerçeve, yalnızca hastaların güvenliğini sağlamakla kalmayacak, aynı zamanda biyoyazım teknolojisinin sürdürülebilir ve güvenilir bir şekilde gelişmesine de olanak tanıyacaktır.

8. GELECEK PERSPEKTİFLERİ

Yapay zekâ destekli biyoyazım teknolojileri, özellikle son beş yılda hızla olgunlaşmakta ve laboratuvar ortamından klinik uygulamalara geçişte önemli bir rol oynamaktadır. Güncel literatür ve öngörüler, bu sistemlerin önümüzdeki yıllarda hem teknik hem de biyolojik açıdan çok daha yetkin hâle geleceğini göstermektedir [10].

Aşağıda, biyoyazıcı ekosisteminde beklenen başlıca gelişmeler ayrıntılı şekilde ele alınmaktadır.

8.1. Tamamen Otonom Biyoyazım Sistemleri

Mevcut biyoyazım platformlarının büyük bir kısmı hâlen operatör müdahalesine ihtiyaç duymaktadır. Bununla birlikte, sensör tabanlı veri toplama ve yapay sinir ağlarıyla entegre edilmiş otonom sistemler, baskı parametrelerini gerçek zamanlı analiz ederek otomatik optimizasyon sağlayacaktır. Bu sayede insan hatası minimize edilecek ve üretim tekrarlanabilirliği artırılacaktır [10].

Otonom sistemler, hücre yoğunluğu, biyomürekkep viskozitesi, sıcaklık ve basınç dalgalanmaları gibi değişkenleri anlık olarak tespit edebilecek ve baskı sürecine adaptif olarak yanıt verebilecektir. Bu durumda, laboratuvar ortamındaki biyofabrikasyon süreçleri daha güvenli, hızlı ve standardize edilmiş bir üretim hattına dönüşecektir.

8.2. Hataları Kendi Kendine Düzelten Kontrol Mekanizmaları

Biyoyazımda nozul tıkanması, malzeme akış bozukluğu veya tabaka kayması gibi hatalar, baskı kalitesini ciddi ölçüde etkileyebilmektedir. Geleceğin yapay zekâ algoritmaları, görüntüleme ve sensör verilerini analiz ederek bu hataları baskı sırasında tespit edecek ve anında düzeltme yapabilecektir.

Örnek uygulamalar şunlardır: derin öğrenme tabanlı görüntü analizi ile katman düzgünlüğünün izlenmesi, akış sensörlerinden gelen geri besleme ile viskozitenin dinamik olarak ayarlanması ve baskı yolunun gerçek zamanlı yeniden hesaplanması. Bu mekanizmalar, üretim sürecinde duraklamaları önleyerek sürekliliği ve kaliteyi güvence altına alacaktır [10].

8.3. Moleküler Düzeyde Optimizasyon Yapan Kuantum Destekli Yapay Zeka Modelleri

Kuantum hesaplama destekli yapay zekâ sistemleri, biyomürekkep formülasyonlarını moleküler düzeyde simüle edebilme yeteneği ile biyoyazımda devrim yaratma potansiyeline sahiptir. Bu modeller, biyopolimer zincirlerinin çözünme davranışını, hücre–hidrojel etkileşimlerini, iyonik çapraz bağlanma kinetiklerini ve protein–matriks uyumunu hassas biçimde tahmin edebilecektir [10].

Böyle bir optimizasyon, deneysel sürenin aylar yerine saatlerle sınırlanmasını sağlayacak ve tamamen yeni nesil, akıllı biyomürekkeplerin geliştirilmesine imkân tanıyacaktır. Bu yaklaşım, özellikle karmaşık doku mühendisliği uygulamalarında büyük avantaj sağlayacaktır.

8.4. Kendini Uyarlayan Biyomürekkep Sistemleri

Geleceğin biyomürekkepleri, çevresel koşullara duyarlı, adaptif yapılar olarak tasarlanacaktır. Bu malzemeler, sıcaklık, pH veya iyon konsantrasyonundaki değişimlere yanıt vererek reolojik özelliklerini otomatik olarak ayarlayabilecek; hücre metabolizmasına göre mekanik sertliğini dinamik biçimde değiştirecek ve baskı sonrası doku olgunlaşmasını destekleyen biyokimyasal sinyaller salabilecektir [10].

Yapay zekâ modelleri, bu geri beslemeleri analiz ederek baskı rejimini anlık optimize edecek ve hücre canlılığını maksimum düzeye çıkaracaktır. Bu yaklaşım, hem üretim verimliliğini hem de klinik uygulanabilirliği artıracaktır.

8.5. Dijital İkiz–Biyoreaktör Entegrasyonlu Kapalı Döngü Üretim Sistemleri

Dijital ikiz teknolojisi, fiziksel biyoyazıcı ve baskı sürecinin sanal bir kopyasının oluşturulmasını sağlayarak simülasyon tabanlı optimizasyona olanak tanır. Gelecekte bu

dijital ikizlerin biyoreaktör sistemleriyle entegre edilmesi öngörülmektedir [10].

Bu entegrasyon sayesinde, baskı sonrası doku olgunlaşması gerçek zamanlı olarak izlenecek; oksijen, besin, büyüme faktörü ve mekanik yük değerleri yapay zekâ tarafından otomatik olarak ayarlanacaktır. Ayrıca, simülasyon ve fiziksel süreç arasında sürekli veri alışverişi sağlanacak; kapalı döngü üretim sistemi ile klinik kaliteye sahip dokular üretilebilecektir. Bu yöntem, özellikle kişiye özel doku mühendisliği ve organ-on-a-chip modellerinde standardizasyon ve yüksek güvenilirlik sağlayacaktır.

Sonuç olarak, söz konusu teknolojik gelişmeler laboratuvar ortamında üretilen dokuların biyomekanik stabilitesini, hücre canlılığını ve klinik uyumluluğunu önemli ölçüde artıracaktır. Kişiye özel doku ve organ üretimi, klinik uygulamalarda daha erişilebilir ve hızlı hâle gelecek; rejeneratif tıpta yeni bir dönemin kapıları aralanacaktır. İnsan vücuduna tamamen uyumlu, fonksiyonel ve hastaya özel dokuların, tam otomasyonlu, sensör kontrollü ve yapay zekâ destekli biyofabrikasyon süreçleriyle üretilebileceği bir gelecek artık bilimsel olarak mümkün görünmektedir.

9. SONUÇ

Bu bölümde sunulan kapsamlı değerlendirmeler, yapay zekâ (YZ) ve biyoyazıcı teknolojilerinin giderek artan bütünleşik yapısının, biyomalzeme üretimi ve doku mühendisliği alanlarında devrim niteliğinde dönüşümler yarattığını göstermektedir. YZ tabanlı optimizasyon algoritmaları, biyomürekkep formülasyonlarının tasarımından baskı parametrelerinin gerçek zamanlı kontrolüne kadar uzanan geniş bir süreç aralığında yüksek doğruluk ve tekrarlanabilirlik sağlamaktadır. Geleneksel deneysel yaklaşımlara kıyasla, YZ destekli modeller hem işlem

maliyetlerini azaltmakta hem de tasarım–deneme–üretim döngüsünü belirgin şekilde hızlandırmaktadır.

Dijital ikiz uygulamaları, biyoyazım sürecinin sanal bir kopyasının oluşturulmasına olanak tanıyarak hem doku baskı dinamiklerinin tahmin edilmesini hem de hücre canlılığı, difüzyon davranışı ve malzeme–hücre etkileşimlerinin çok değişkenli analizini mümkün kılmaktadır. Bu yaklaşım, klinik uyumlu kişiselleştirilmiş dokuların üretilmesi için önemli bir temel oluşturmaktadır. Ayrıca makine öğrenimi yöntemlerinin, baskı sonrası kalite kontrolünde görüntü analitiği aracılığıyla hataların erken tespit edilmesini sağlaması, üretim güvenilirliğini artıran kritik bir yenilik olarak ortaya çıkmaktadır.

YZ ve biyoyazıcı entegrasyonunun sunduğu bu avantajlara rağmen, biyolojik verilerin heterojenliği, standartlaştırılmış veri setlerinin eksikliği, etik boyutlar ve klinik doğrulama süreçlerinin karmaşıklığı halen çözülmesi gereken önemli sorunlar arasındadır. Bununla birlikte mevcut eğilimler, tam otonom biyoyazıcı platformlarının, ileri sensör sistemleri ve gerçek zamanlı geri besleme mekanizmaları ile birleştirilerek yakın gelecekte daha yaygın hale geleceğine işaret etmektedir. Uzun vadede ise kuantum hesaplama, çok ölçekli biyofiziksel modelleme ve yüksek performanslı yapay sinir ağlarının birleşmesiyle, biyoyazım süreçlerinin daha kesin, kişiselleştirilmiş ve klinik olarak uygulanabilir hale gelmesi beklenmektedir.

Sonuç olarak, YZ destekli biyoyazım teknolojileri hem bilimsel araştırmalarda hem de klinik uygulamalarda yeni fırsatlar sunmakta; doku mühendisliği, biyomalzeme geliştirme ve rejeneratif tıp alanlarında önemli bir paradigma değişiminin habercisi olmaktadır. Bu gelişmeler, gelecekte tam fonksiyonlu, hasta-özel dokuların üretilbildiği, yüksek verimlilik ve

güvenilirlik sağlayan biyoyazım platformlarının yaygın olarak kullanılacağı bir döneme işaret etmektedir.

KAYNAKÇA

1. Murphy, S. V., & Atala, A. (2014). *3D bioprinting of tissues and organs*. Nature Biotechnology.
2. Kim, Y. et al. (2020). *Artificial intelligence in 3D bioprinting*. Biofabrication.
3. Zhang, Y. S., & Yue, K. (2022). *Machine learning in bioprinting*. Advanced Healthcare Materials.
4. Skardal, A., & Shupe, T. (2023). *Smart biofabrication using artificial intelligence*. Trends in Biotechnology.
5. Lee, J. H. et al. (2021). *Deep learning-based image analysis in bioprinting*. Biomaterials Science.
6. Park, S. et al. (2023). *Digital twin framework for bioprinting optimization*. Bioengineering.
7. Rossi, F. et al. (2024). *AI-driven bioink design for regenerative medicine*. Advanced Science.
8. Wu, C., & Li, Y. (2022). *Real-time AI feedback control in extrusion bioprinting*. Journal of Biomechanical Engineering.
9. Chen, X. et al. (2023). *Organ-on-a-chip platforms enhanced with machine learning models*. Lab on a Chip.
10. Nguyen, H. et al. (2024). *Quantum-assisted optimization models in bioprinting*. Nature Computational Science.

MOBİLYA KAPAKLARINDA GÖRSEL VE DOKUNSA ETKİ YARATMA YÖNTEMLERİ: UV BASKI VE LAZER KAZIMA

Kadir KAYAHAN¹

1. GİRİŞ

Mobilya endüstrisi, teknolojik gelişmelerin etkisiyle üretim süreçlerinde ve yüzey dekorasyonunda önemli bir dönüşüm yaşamaktadır. Özellikle mobilya kapaklarında estetik ve fonksiyonel beklentilerin artması, yeni baskı tekniklerinin geliştirilmesini ve uygulanmasını zorunlu kılmıştır. Bu bağlamda, lazer baskı ve UV baskı teknikleri, mobilya kapaklarının yüzeylerinde hem görsel zenginlik hem de dayanıklılık sağlama potansiyeliyle öne çıkmaktadır. Bu kitap bölümünün giriş kısmında, mobilya kapaklarında lazer baskı ve UV baskı tekniklerinin kullanımının temel gerekçeleri, teknolojik altyapısı, sektörel gereksinimler ve multidisipliner yaklaşımlar çerçevesinde ele alınacaktır.

Mobilya kapaklarında yüzey dekorasyonu, yalnızca estetik bir unsur olmanın ötesinde, ürünün pazardaki rekabet gücünü ve kullanıcı deneyimini doğrudan etkileyen bir faktördür. Geleneksel yüzey işlemleri ve dekoratif kaplamalar, uzun yıllar boyunca sektörün temel yöntemleri arasında yer almıştır. Ancak, günümüzde tüketici beklentilerinin çeşitlenmesi, kişiselleştirilmiş tasarımlara olan talebin artması ve sürdürülebilirlik kaygıları, daha yenilikçi ve esnek baskı teknolojilerinin geliştirilmesini teşvik etmiştir. Dijital baskı

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Bartın Üniversitesi, Bartın Meslek Yüksekokulu, Mobilya ve Dekorasyon, ORCID: 0000-0003-4837-6472.

teknolojilerinin gelişimiyle birlikte, lazer kesim ve UV baskı teknikleri, mobilya yüzeylerinde yüksek çözünürlüklü, canlı renkli ve uzun ömürlü desenlerin uygulanmasına olanak tanımaktadır. Oğuz Tunçel'in "Dijital Çağda Baskı Teknolojileri" adlı çalışmasında da vurgulandığı üzere, dijital baskı teknolojileri, geleneksel tekniklerle rekabet edebilecek hız ve kaliteye ulaşmış, esnek üretim ve kişiselleştirme olanakları ile sektörde önemli bir dönüşüm başlatmıştır (Tunçel, 2019). Tunçel, dijital baskının geleneksel baskı tekniklerinden farklı olarak, müşteri ile etkileşime açık, değer katan ve kişiselleştirilmiş üretime olanak sağlayan bir yapıya sahip olduğunu belirtmektedir (Tunçel, 2019). Bu dönüşüm, mobilya sektöründe de baskı tekniklerinin yeniden değerlendirilmesini ve yenilikçi yöntemlerin entegrasyonunu gündeme getirmiştir.

Mobilya endüstrisinde son yıllarda yaşanan teknolojik gelişmeler, üretim süreçlerinde verimlilik, hassasiyet ve estetik açıdan önemli yeniliklerin ortaya çıkmasına olanak sağlamıştır. Özellikle lazer kesim teknolojisinin mobilya üretiminde kullanılması, geleneksel yöntemlere kıyasla birçok avantaj sunmakta ve mobilya kapaklarında yeni tasarım olanakları yaratmaktadır. Lazer kesim, yüksek hassasiyet, hızlı üretim, karmaşık geometrilerin kolayca işlenebilmesi ve malzeme kaybının minimize edilmesi gibi özellikleriyle öne çıkmaktadır. Bu bağlamda, mobilya kapaklarında lazer kesim uygulamalarının çok boyutlu etkileri hem üretim süreçleri hem de nihai ürün kalitesi açısından multidisipliner bir araştırma konusu olarak önem kazanmaktadır.

UV baskı tekniği ise, özellikle son yıllarda mobilya sektöründe hızla yaygınlaşan bir diğer dijital baskı yöntemidir. UV (Ultraviyole) baskı, özel mürekkeplerin yüzeye püskürtülmesi ve ardından UV ışığı ile anında kurutulması esasına dayanır. Bu teknoloji, yüksek çözünürlüklü ve canlı renklerin elde edilmesini sağlarken, aynı zamanda baskı yapılan

yüzeyde mürekkebin hızlı bir şekilde sabitlenmesini ve dayanıklılığın artmasını mümkün kılar. UV baskı, ahşap, MDF, cam, metal ve plastik gibi çok çeşitli yüzeylerde uygulanabilmesiyle mobilya kapaklarında geniş bir kullanım alanına sahiptir. UV baskı teknolojisinin sunduğu en önemli avantajlardan biri, mürekkebin yüzeyde kalın bir tabaka oluşturmadan, ince ve homojen bir şekilde yayılmasıdır. Bu sayede, baskı yapılan yüzeyde dokusal bir değişiklik oluşmaz ve orijinal malzeme dokusu korunur. Ayrıca, UV baskı ile elde edilen desenler, çizilme, solma ve kimyasal etkilere karşı yüksek direnç gösterir. Dijital baskı sistemlerinde kullanılan mürekkep ve baskı parametrelerinin, baskı kalitesi ve dayanıklılığı üzerinde doğrudan etkili olduğu, Bekir Keskin ve arkadaşlarının dijital baskı sistemleri üzerine yaptıkları çalışmada da vurgulanmaktadır (Keskin et al., 2021). Keskin ve arkadaşları, dijital baskı makinelerinde kullanılan farklı tarama (screening) yöntemlerinin, renk tutarlılığı, nokta kazancı ve baskı yoğunluğu gibi temel kalite parametrelerinde belirgin farklılıklar yarattığını belirtmektedir (Keskin et al., 2021). Bu bulgu, UV baskı teknolojisinde de baskı parametrelerinin ve mürekkep türlerinin, mobilya kapaklarında elde edilen görsel ve fiziksel kalite üzerinde kritik bir rol oynadığını göstermektedir.

Mobilya kapaklarında lazer ve UV baskı tekniklerinin kullanımı, yalnızca estetik açıdan değil, aynı zamanda fonksiyonel ve sürdürülebilirlik boyutlarıyla da değerlendirilmektedir. Özellikle UV baskı teknolojisinde kullanılan mürekkeplerin çevre dostu ve düşük uçucu organik bileşik (VOC) içeriğine sahip olması, sürdürülebilir üretim hedefleriyle uyumlu bir yaklaşım sunmaktadır. Elif Ural ve arkadaşlarının baskı mürekkepleri üzerine yaptıkları terminolojik çalışmada, mürekkebin renk, parlaklık, opaklık, ışık haslığı, yapışkanlık ve viskozite gibi temel teknik özelliklerinin, baskı kalitesi ve malzeme uyumluluğu açısından belirleyici olduğu

ifade edilmektedir (Ural et al., 2022). Bu teknik özellikler, UV baskı mürekkeplerinin mobilya kapaklarında uzun ömürlü ve estetik açıdan üstün sonuçlar vermesini sağlayan temel unsurlardır. Ayrıca, mürekkebin yüzeye uygulama kalınlığının ve kuruma sürecinin, baskı kalitesini doğrudan etkilediği, Osman Simşeker'in metal ambalaj üretiminde ofset baskı mürekkep çeşitleri ve miktarının baskı sonuçlarına etkisini incelediği çalışmada da ortaya konmuştur (Simseker, 2021). Simşeker, mürekkep çeşidi ve miktarının, baskı yoğunluğu ve parlaklığı üzerinde önemli etkiler yarattığını, yüzey kaplamasının ise baskı kalitesini artırdığını belirtmektedir (Simseker, 2021). Bu bulgular, UV baskı tekniğinde de mürekkep seçimi ve uygulama parametrelerinin, mobilya kapaklarında istenen kalite standartlarına ulaşmada kritik rol oynadığını göstermektedir.

Mobilya kapaklarında lazer ve UV baskı tekniklerinin uygulanmasında, yüzey özellikleri ve malzeme yapısı da önemli bir belirleyici olarak öne çıkmaktadır. Cem Aydemir'in kâğıt yüzey pürüzlülüğünün baskı renk değişimi, ışık haslığı ve baskı parlaklığına etkisini incelediği çalışmasında, yüzey topografyasının baskı mürekkebinin yayılması ve yerleşmesi üzerinde belirleyici olduğu vurgulanmaktadır (Aydemir, 2015). Aydemir, yüzeyin makro gözenekli ve kaba yapıda olması durumunda, mürekkebin daha fazla yayılacağını ve kâğıt içine nüfuz edeceğini belirtmektedir (Aydemir, 2015). Bu bulgu, mobilya kapaklarında kullanılan ahşap, MDF veya diğer kompozit malzemelerin yüzey özelliklerinin hem lazer hem de UV baskı tekniklerinde elde edilen sonuçlar üzerinde doğrudan etkili olduğunu göstermektedir. Yüzeyin düzgünlüğü, gözenekliliği ve emiciliği, baskı mürekkebinin yüzeyde tutunmasını, renk yoğunluğunu ve desenin netliğini belirleyen temel faktörlerdir. Özellikle UV baskı tekniğinde, yüzeyin düzgün ve kapalı olması, mürekkebin homojen bir şekilde

yayılmasını ve yüksek çözünürlüklü desenlerin elde edilmesini kolaylaştırır.

Bekir Keskin ve arkadaşlarının dijital baskı sistemlerinde tarama yöntemlerinin baskı kalitesine etkisini incelediği çalışmada da belirtildiği gibi, baskı parametrelerinin ve teknik altyapının doğru seçimi, istenen kalite standartlarına ulaşmada belirleyici olmaktadır (Keskin et al., 2021). Bu nedenle, mobilya kapaklarında lazer ve UV baskı tekniklerinin kullanımı hem teknolojik hem de tasarımsal açıdan sürekli gelişen ve yenilenen bir alan olarak değerlendirilmektedir.

2. UV BASKI VE LAZER KAZIMA TEKNİĞİ

Mobilya kapaklarında lazer baskı ve UV baskı tekniklerinin kullanımı, son yıllarda hem endüstriyel üretimde hem de sanatsal uygulamalarda dikkat çeken bir araştırma alanı haline gelmiştir. Bu tekniklerin mobilya yüzeylerinde uygulanabilirliği, baskı kalitesi, dayanıklılık, estetik çeşitlilik ve sürdürülebilirlik gibi çok boyutlu avantajlar sunması, literatürde geniş bir inceleme alanı oluşturmuştur. Bu bölümde, lazer baskı ve UV baskı tekniklerinin mobilya kapaklarında kullanımına ilişkin literatürde öne çıkan başlıklar, teknik süreçler, malzeme uyumluluğu, baskı kalitesi ve çağdaş uygulamalar detaylı bir şekilde ele alınacaktır.

2.1.Lazer Kesim Tekniği ve Mobilya Kapaklarında Kullanımı

Mobilya kapaklarında lazer kesim uygulamalarının bir diğer önemli boyutu, geleneksel motiflerin modern üretim teknikleriyle buluşturulmasıdır. Esra Seçim ve Feriha Akpınarlı'nın çalışmasında, geleneksel dantel motiflerinin lazer kesim yöntemiyle tekstil yüzeyine aktarılması incelenmiştir. Çalışmada, seçilen dantel motiflerinin şekillendirilerek lazer

kesim yöntemiyle farklı yüzey tekstillerine aktarılması ve bir ürüne dönüştürülmesi süreci detaylandırılmıştır. Modern üretim yöntemlerinin sunduğu olanaklar sayesinde, tekstilde daha önce kullanılamayan malzemeler ve desenler şekillendirilebilmekte, bu da tasarımcılara ve mobilya üreticilerine yeni estetik olanaklar sunmaktadır (Seçim & Akpınarlı, 2018). Bu yaklaşım, mobilya kapaklarında lazer kesim ile geleneksel motiflerin çağdaş ürünlere entegre edilmesinin yolunu açmaktadır.



Şekil 1. Mobilya kapaklarında lazer kesim tekniği uygulamaları (URL-1)

2.2. UV Baskı Tekniği ve Mobilya Kapaklarında Kullanımı

UV baskı, özellikle endüstriyel üretimde, hızlı kuruma ve yüksek baskı kalitesi gibi avantajlarıyla öne çıkan bir tekniktir. UV baskı sistemlerinde, özel UV mürekkepler kullanılır ve baskı işlemi sırasında mürekkep, ultraviyole ışıkla anında kurutulur. Bu özellik, özellikle mobilya kapakları gibi büyük ve düz yüzeylerde, yüksek hızda ve kaliteli baskı yapılmasını sağlar. Osman Simseker'in metal ambalaj üretiminde ofset baskı mürekkep çeşitleri ve miktarının baskı sonuçlarına etkilerini

incelediği çalışmada, UV mürekkep ile yapılan baskılarda baskı parlaklığında etkin bir artış sağlandığı ve mürekkep çeşidi ile miktarının baskı densitesi ve parlaklığını doğrudan etkilediği saptanmıştır. Ayrıca, emaye kaplamanın baskı kalitesine olumlu etkisi olduğu, UV mürekkep ile yapılan baskıların özellikle parlaklık ve renk yoğunluğu açısından avantaj sağladığı belirtilmiştir (Simseker, 2021). Bu bulgular, UV baskı tekniğinin mobilya kapaklarında da yüksek parlaklık ve renk doygunluğu elde etmek için uygun bir yöntem olduğunu göstermektedir.



Şekil 2. Mobilya kapaklarında UV baskı tekniği uygulamaları (URL-2)

2.3. Baskı Mürekkepleri ve Yüzey Özellikleri

Baskı mürekkeplerinin teknik özellikleri, baskı kalitesi ve dayanıklılığı açısından belirleyicidir. Elif Ural ve arkadaşlarının baskı mürekkepleri temel terimlerinin tanımlanmasına yönelik çalışmasında, mürekkebin renk, parlaklık, opaklık, ışık haslığı, yapışkanlık ve viskozite gibi temel özelliklerinin baskı kalitesini doğrudan etkilediği vurgulanmaktadır. Mürekkebin yüzeye çok

ince bir tabaka halinde uygulanması ve baskı sistemine bağlı olarak 5 ila 125 mikron kalınlığa sahip olabilmesi, özellikle mobilya kapaklarında hem estetik hem de fonksiyonel gereksinimlerin karşılanmasında önemlidir. Mürekkebin optimum kullanımı ve teknik iletişim için bu terimlerin iyi anlaşılması gerekmektedir (Ural et al., 2022). Bu bilgiler, UV baskı ve lazer baskı uygulamalarında kullanılacak mürekkep ve kaplama malzemelerinin seçimi açısından yol göstericidir.

Baskı yüzeyinin özellikleri de baskı kalitesini etkileyen önemli bir faktördür. Cem Aydemir'in kâğıdın yüzey pürüzlülüğünün baskı renk değişimi, ışık haslığı ve baskı parlaklığına etkisini incelediği çalışmada, yüzeyin pürüzlülüğünün mürekkebin yayılması ve yerleşmesi üzerinde belirleyici olduğu, daha pürüzlü yüzeylerde mürekkebin daha fazla yayıldığı ve renk sapması ile parlaklık değişimlerinin gözlendiği belirtilmiştir (Aydemir, 2015). Mobilya kapaklarında kullanılan MDF, sunta veya masif ahşap gibi yüzeylerin pürüzlülüğü ve kaplama türü hem lazer hem de UV baskı uygulamalarında baskı kalitesini doğrudan etkilemektedir.

2.4. Baskı Tekniklerinin Endüstriyel ve Sanatsal Uygulamaları

Baskı tekniklerinin endüstriyel ve sanatsal uygulamaları, tekniklerin gelişimiyle birlikte çeşitlenmiştir. Eda Uzun'un özgün baskı resim teknikleri ve reklam ilişkisi üzerine yaptığı çalışmada, yüksek ve çukur baskı, taş baskı ve elek baskı gibi tekniklerin farklı dönemlerde reklam aracı olarak kullanıldığı, baskı tekniklerinin gelişmesine bağlı olarak basılı reklamların biçimsel ve işlevsel olarak değiştiği belirtilmiştir (Uzun, 2023). Bu tarihsel gelişim, mobilya kapaklarında lazer ve UV baskı gibi yeni tekniklerin de hem endüstriyel hem de sanatsal amaçlarla kullanılabileceğini göstermektedir.

Lazer baskı ve UV baskı tekniklerinin mobilya kapaklarında kullanımı, sadece dekoratif amaçlarla sınırlı değildir. Fonksiyonel yüzeyler, kişiselleştirilmiş tasarımlar ve marka kimliği oluşturma gibi alanlarda da bu teknikler yaygınlaşmaktadır. Lazer baskı ile yapılan uygulamalarda, yüzeyde mikron seviyesinde detaylar elde edilebilmekte, UV baskı ile ise yüksek renk doygunluğu ve parlaklık sağlanabilmektedir. Bu tekniklerin bir arada veya ayrı ayrı kullanılması, mobilya endüstrisinde yenilikçi ürünlerin geliştirilmesine olanak tanımaktadır.

2.5. Dijital Baskı Teknolojilerinin Gelişimi ve Mobilya Sektörüne Etkileri

Dijital baskı teknolojilerinin gelişimi, mobilya sektöründe de önemli dönüşümlere yol açmıştır. Oğuz Tunçel'in dijital çağda baskı teknolojileri üzerine yaptığı çalışmada, dijital baskı teknolojilerinin geleneksel baskı teknikleriyle rekabet ettiği, hız ve kalite açısından önemli avantajlar sunduğu, dijitalleşen üretim süreçlerinin müşteri ile etkileşime açık, kişiselleştirilmiş ve esnek stratejiler geliştirilmesine olanak tanıdığı vurgulanmaktadır (Tunçel, 2019). Mobilya kapaklarında lazer ve UV baskı tekniklerinin dijital üretim süreçleriyle entegrasyonu hem üretim hızını artırmakta hem de müşteri taleplerine hızlı yanıt verilmesini sağlamaktadır.

Ayrıca, dijital baskı makinelerinin teknik ve ekonomik açıdan gelişimi, baskı kalitesi, maliyet ve üretim süresi gibi faktörler üzerinde doğrudan etkili olmuştur. Özkan Kozalı'nın Türkiye'de matbaacılık sektöründe kullanılan kuru tonerli dijital baskı sistemlerinin gelişimini incelediği çalışmada, dijital baskı makinelerinin kısa sürede hızlı gelişim gösterdiği, baskı hızının ve kalitesinin arttığı, maliyetlerin ise düştüğü belirtilmiştir (Kozalı, 2019). Bu gelişmeler, mobilya sektöründe de dijital baskı tekniklerinin yaygınlaşmasını ve lazer ile UV baskı

uygulamalarının endüstriyel ölçekte kullanılmasını kolaylaştırmıştır.

2.6. Baskı Kalitesi, Optimizasyon ve Sürdürülebilirlik

Baskı kalitesinin optimizasyonu hem lazer hem de UV baskı tekniklerinde önemli bir araştırma konusudur. Mustafa Kısa'nın gazete baskılarında kullanılan web ofset baskı mürekkeplerinin viskozite değerlerinin karşılaştırılması üzerine yaptığı çalışmada, mürekkep viskozitesinin baskı sonucu ve kalitesine etkileri deneysel olarak incelenmiş, ideal viskozite değerlerinin dışında kalan mürekkeplerle yapılan baskılarda renk bozulmaları, keskinlik ve kontrast kayıpları yaşandığı gözlemlenmiştir (Kısa, 2023). Bu bulgular, mobilya kapaklarında kullanılacak mürekkep ve baskı parametrelerinin dikkatle seçilmesi gerektiğini göstermektedir. Sürdürülebilirlik açısından, baskı tekniklerinde doğal ve çevre dostu malzemelerin kullanımı da önem kazanmaktadır. Menekşe Suzan Teker ve Kartal Murat Ayvaz'ın uçucu yağı alınmış bitki posalarının tekstil baskıda kullanılabilirliği üzerine yaptığı çalışmada, serigrafi baskı tekniğinin doğal boyaların endüstriyel entegrasyonu için önemli avantajlar sunduğu, doğal boyaların tekstil yüzeyine aktarılmasında yeterli haslık sağlandığı ve sürdürülebilirliğe olumlu katkılar sağlandığı belirtilmiştir (Teker & Ayvaz, 2024). Bu yaklaşım, mobilya kapaklarında da çevre dostu mürekkep ve kaplama malzemelerinin kullanılmasıyla sürdürülebilir üretim süreçlerinin desteklenebileceğini göstermektedir.

3. SONUÇ

Literatür taraması sonucunda, lazer baskı ve UV baskı tekniklerinin mobilya kapaklarında kullanımıyla ilgili olarak, tekniklerin gelişimi, uygulama alanları, baskı kalitesi ve sürdürülebilirlik gibi başlıklarda önemli bulgular elde edilmiştir. Lazer baskı, yüksek hassasiyet ve detay sunarken, UV baskı hızlı

kuruma ve yüksek parlaklık avantajı sağlamaktadır. Her iki teknik de dijital üretim süreçleriyle entegre edilerek, mobilya sektöründe yenilikçi ve kişiselleştirilmiş ürünlerin geliştirilmesine olanak tanımaktadır. Baskı mürekkepleri ve yüzey özellikleri, baskı kalitesi üzerinde belirleyici rol oynamakta; sürdürülebilirlik ise doğal ve çevre dostu malzemelerin kullanımını teşvik etmektedir. Ayrıca mobilya kapaklarında lazer kesim uygulamaları, malzeme seçimi, kesim parametreleri, yüzey kalitesi, üretim verimliliği ve estetik tasarım olanakları açısından multidisipliner bir araştırma alanı sunmaktadır. Cam, ahşap ve tekstil gibi farklı malzemelerin lazerle işlenmesi sırasında elde edilen bulgular, mobilya endüstrisinde lazer kesim teknolojisinin yaygınlaşmasının önünü açmakta ve sektöre yenilikçi çözümler sunmaktadır. Lazer kesim uygulamalarının mobilya kapaklarında sağladığı avantajlar hem üretim süreçlerinde hem de nihai ürünlerde kalite, verimlilik ve estetik açıdan önemli katkılar sunmaktadır.

Bu bulgular, mobilya kapaklarında lazer ve UV baskı tekniklerinin etkin ve verimli kullanımına yönelik gelecekteki araştırmalar ve uygulamalar için sağlam bir temel oluşturmaktadır. Bu nedenle, lazer kesim teknolojisinin mobilya kapaklarında uygulanmasına yönelik araştırmalar, sektörün geleceği açısından büyük önem taşımaktadır.

KAYNAKÇA

- Akpınarlı, H. F., & Seçim, E. (2018). Geleneksel Dantel Motiflerinin Lazer Kesim Yöntemi İle Tekstil Yüzeyine Aktarılması. *Kesit Akademi Dergisi*, 4(15), 192-202.
- Aydemir, C. (2015). Kâğıdın yüzey pürüzlülüğünün, baskı renk değişimi, ışık haslığı ve baskı parlaklığına etkisi. *Marmara Fen Bilimleri Dergisi* 26(3). <https://doi.org/10.7240/mufbed.86137>
- Keskin, B., Şahin, C., Özomay, Z., Ozomay, Z., Keskin, B., Özomay, Z., & Şahin, C. (2021). Investigation of the effect of different screening methods on print quality in digital printing system. *Politeknik Dergisi* 24(3). <https://doi.org/10.2339/politeknik.884893>
- Kısa, M. (2023). Gazete baskılarında kullanılan web ofset baskı mürekkeplerinin viskozite değerlerinin karşılaştırması. *Selçuk İletişim* 16(1). <https://doi.org/10.18094/josc.1116736>
- Kozalı, Ö. (2019). Türkiye’de matbaacılık sektöründe kullanılan kuru tonerli dijital baskı sistemlerinin teknik ve ekonomik açıdan gelişiminin incelenmesi. *Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*. <https://doi.org/dspace.trakya.edu.tr/xmlui/handle/trakya/5049>
- Simseker, O. (2021). Metal ambalaj üretiminde kullanılan ofset baskı mürekkep çeşidi ve miktarının, baskı sonuçlarına etkilerinin incelenmesi. *Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*. <https://doi.org/dergipark.org.tr/tr/pub/dufed/issue/59773/844461>
- Teker, M. S. & Ayvaz, K. M. (2024). Usability of essential oil extracted plant pulp in screen printing in the context of

sustainability. *Sanat ve Yorum* (44).
<https://doi.org/10.47571/sanatyorum.1429375>

Tunçel, O. (2019). Dijital çağda baskı teknolojileri. *Ankara Hacı Bayram Veli Üniversitesi Güzel Sanatlar Fakültesi Sanat ve Tasarım Dergisi*.
<https://doi.org/www.idealonline.com.tr/IdealOnline/lookAtPublications/paperDetail.xhtml?uId=102067>

Ural, E., Özdemir, L., Oktav, M., & Büyükpehlivan, G. A. (2022). Baskı mürekkepleri temel terimlerinin tanımlanması. *Avrasya Terim Dergisi* 10(1).
<https://doi.org/10.31451/ejatd.1022742>

Ural, E., Özdemir, L., Oktav, M., & Büyükpehlivan, G. A. (2022). Baskı mürekkepleri temel terimlerinin tanımlanması. *Avrasya Terim Dergisi* 10(1).
<https://doi.org/10.31451/ejatd.1022742>

Uzun, E. (2023). Özgün baskı resim teknikleri ve reklam ilişkisi. *RumeliDE Dil ve Edebiyat Araştırmaları Dergisi* (37).
<https://doi.org/10.29000/rumelide.1405771>

URL-1: <https://www.elcilazerkesim.com/urunler/ahsap-lazer-kesim/mdf-kesim> (Erişim tarihi: 12.11.2025)

URL-2:https://www.homify.com.tr/yeni_fikirler/6600751/izmir-den-uv-baski-ile-kisiye-ozel-dolap-tasarimlari#idea_book_room_11192974 (Erişim tarihi: 12.11.2025)

YAPAY ZEKÂ TEMELLİ YÖNTEMLERLE ET VE ET ÜRÜNLERİNDE NESNE TESPİTİ

Hasan İbrahim KOZAN¹

Hasan Ali AKYÜREK²

1. GİRİŞ

Et ve et ürünlerinde kalite ve güvenliğin izlenmesi; üretim hattı verimliliği, ürün standardizasyonu ve tüketiciye güvenli ürün arzı bakımından kritik bir denetim problemidir (Khaled, Parrish, & Adedeji, 2021; Sun et al., 2025). Literatürde et kalitesinin değerlendirilmesinde kullanılan geleneksel yaklaşımların (ör. fiziksel/kimyasal kalite parametrelerine dayalı sınıflamalar) hızlı işleme hatları için çoğu durumda emek-yoğun ve zaman alıcı olabildiği; bu durumun endüstriyel ölçekte pratik kısıtlar doğurabildiği vurgulanmaktadır (Barbon, Ana Paula Ayub da Costa, Mantovani, & Barbin, 2018). Bu nedenle, et ve et ürünlerinin kalite ve güvenlik değerlendirmesinde hızlı ve tahribatsız tekniklere yönelim artmış; özellikle elektronik burun, bilgisayarlı görü, spektroskopi ile multi/hiper-spektral görüntüleme gibi yaklaşımlar et kalite ve güvenliği bağlamında kapsamlı biçimde incelenmiştir (Khaled et al., 2021). Benzer şekilde, sensörler ve yapay zekâ bileşenleriyle desteklenen akıllı değerlendirme süreçlerinin, et endüstrisinin dijital dönüşümünde ürün kalitesi ve güvenliğini güçlendiren bir rol oynadığı; tedarik

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Meram Meslek Yüksekokulu, Gıda İşleme Bölümü, ORCID: 0000-0002-2453-1645.

² Dr. Öğr. Üyesi, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Tıp Fakültesi, Temel Tıp Bilimleri Bölümü, Biyoistatistik ve Tıbbi Bilişim ABD, ORCID: 0000-0002-0520-9888.

zinciri ve soğuk zincir izleme gibi senaryolarda gerçek zamanlı izleme ve tazelik tanıma uygulamalarının öne çıktığı bildirilmektedir (Sun et al., 2025).

Bu dönüşümün önemli bir bileşeni, görüntüleme tabanlı kontrolü otomasyona taşıyan bilgisayarlı görü sistemleridir (Khaled et al., 2021). Bilgisayarlı görü temelli analizlerin; hızlı, tahribatsız ve tekrarlanabilir ölçüm sağlayarak tarım-gıda ve et kalitesi değerlendirmesinde kullanılabilirdiği; ayrıca yapay sinir ağları gibi yöntemlerle birleştirildiğinde izlenebilirlik süreçlerine katkı sunduğu belirtilmektedir (Alvarez-García, Mendoza, Muñoz-Vílchez, Nuñez-Melgar, & Quilcate, 2024). Gıda işleme endüstrisinde görsel özelliklere dayalı sınıflama, kontaminasyon ve taşıyıcı tespiti gereksiniminin yaygın oluşu; buna karşılık etiket gerektirmeyen, girişimsel olmayan ve hızlı görsel denetim tekniklerine duyulan ihtiyacın altı çizilmektedir (Lopes, Ludwig, Barbin, Grossmann, & Barbon, 2019). Et özelinde ise sensör teknolojileri ve yapay zekâdaki ilerlemelerin, et ve balık gibi ürünlerde otomatik kalite ve özgünlük değerlendirme çözümlerini mümkün kıldığı; hatta derin evrimsel sinir ağlarının (DEEP CNN) gömülü donanım üzerinde kalite kestirimi için kullanılabilirdiği gösterilmiştir (Kolosov et al., 2023). Bunun yanı sıra, hızlı hatlarda yaygın kalite sınıflamalarına temel oluşturan renk, su tutma kapasitesi (WHC) ve pH gibi parametrelerin ölçüm ve karar süreçleri endüstriyel hız gereksinimleriyle çatışabildiğinden, daha otomatik ve hızlı analitik yaklaşımların gerekliliği vurgulanmaktadır (Barbon et al., 2018).

Bu çerçevede nesne tespiti, et ve et ürünleri görüntülerinde yalnızca ürün/kalite sınıfı çıktısı üretmekten öte; kusur, bozulma belirtisi ve yabancı madde gibi görsel anormalliklerin konumunu ve kapsamını belirleyerek denetim kararlarını eyleme dönüştürülebilir hâle getiren bir bilgisayarlı görü görevidir (Litjens et al., 2017). Nesne tespiti, modern derin öğrenme ekosisteminde sınıflandırma ve bölütleme gibi

görevlerle birlikte ele alınan temel problem alanları arasında yer almakta; görüntü analizi literatüründe yaygın biçimde tanımlanan bir görev ailesinin parçası olarak tartışılmaktadır (Litjens et al., 2017). Derin öğrenmenin katmanlı hiyerarşik temsil öğrenme yaklaşımı, bilgisayarlı görü dâhil pek çok alanda başarıyla benimsenmiş; bu yaklaşımın örüntü tanıma, sınıflama ve tahmin problemlerinde güçlü temsiller çıkardığı ifade edilmiştir (Zhao et al., 2019). Bu genel teknik ilerlemenin kurumsallaşmasında, büyük ölçekli görüntü veri kümeleri ve yarışmaların (ör. ImageNet) nesne sınıflandırma ve tespiti alanındaki gelişmeyi hızlandırdığı; nesne tespiti için karşılaştırmalı değerlendirme zemini oluşturduğu gösterilmiştir (Russakovsky et al., 2015). Dolayısıyla, et ve et ürünleri gibi görsel kalite ipuçlarının bulunduğu gıda bağlamlarında nesne tespitinin sistematik biçimde ele alınması, hem tahribatsız denetim teknolojileri literatürünün yönelimiyle hem de bilgisayarlı görü alanının metodolojik olgunlaşmasıyla uyumludur (Khaled et al., 2021; Russakovsky et al., 2015).

Bununla birlikte, gerçek dünya kalite kontrol senaryolarında derin öğrenme tabanlı kararların kara kutu niteliği, uzman güveni ve uygulama kabulü açısından bir risk alanı olarak raporlanmaktadır (Reyes et al., 2020). Görüntü temelli yapay zekâ sistemlerinin doğru çalıştığından emin olma ve uzmanların sisteme güven duymasını sağlama hedefiyle yorumlanabilirlik yaklaşımlarına artan ilgi olduğu; klinik görüntüleme bağlamında bu ihtiyacın özellikle vurgulandığı belirtilmiştir (Reyes et al., 2020). Benzer şekilde, açıklanabilir yapay zekâ araştırmalarının performansın yanı sıra kullanıcı deneyimi ile de ilişkilendirildiği; açıklanabilirliğin, açıklanamayan kararların kullanıcı deneyimini düşürebileceği problemine yanıt olarak ele alındığı ifade edilmiştir (S. Park, Kim, Park, & Lee, 2023). Derin öğrenmenin güçlü performansına rağmen açıklanabilirlik ve şeffaflık ihtiyacının sürdüğü; bu nedenle açıklanabilir derin öğrenme

modellerinin sistematik olarak tartışıldığı da bildirilmiştir (Singh, Sengupta, & Lakshminarayanan, 2020). Et endüstrisinde yapay zekâ destekli kalite izleme ve tazelik tanıma gibi uygulamaların yaygınlaşmasının hedeflendiği düşünüldüğünde, nesne tespiti çıktılarının yalnızca doğru değil, aynı zamanda denetim operatörleri açısından anlaşılır ve gerekçelendirilebilir biçimde sunulması pratik değer taşımaktadır (S. Park et al., 2023; Sun et al., 2025).

Bu çalışmanın amacı, et ve et ürünlerinde yapay zekâ temelli nesne tespitini; (i) tahribatsız kalite-güvenlik değerlendirme teknolojilerinin et literatüründeki konumu, (ii) derin öğrenme ile nesne tespiti yöntemlerinin bilgisayarlı görü literatüründeki metodolojik temelleri ve değerlendirme pratikleri, (iii) endüstriyel et uygulamalarında gerçek zamanlılık, gömülü sistemler ve izlenebilirlik gibi uygulama gereksinimleri ve (iv) açıklanabilirlik ve kullanıcı güveni boyutları ile birlikte bütüncül biçimde ele almaktır (Alvarez-García et al., 2024; Khaled et al., 2021; Kolosov et al., 2023; Litjens et al., 2017; S. Park et al., 2023; Russakovsky et al., 2015). Bu bütüncül yaklaşım, et endüstrisinin akıllı üretim ve tedarik zinciri bağlamında kalite ve güvenliği yükseltme hedefleriyle uyumlu olarak, nesne tespitinin algoritma düzeyinden uçtan uca denetim sistemi düzeyine taşınmasına katkı sunmayı hedefler (Khaled et al., 2021; Sun et al., 2025).

2. ET GÖRÜNTÜLERİNİN YAPISAL ÖZELLİKLERİ VE ZORLUKLAR

2.1. Görsel ve Biyofiziksel Heterojenlik: Doku, Yağ ve Bağ Dokusu Kaynaklı Karmaşıklık

Et ve et ürünlerinin görüntüleri, kas dokusunun ve intramüsküler bileşenlerin özellikle yağ ve bağ doku dağılımına bağlı olarak belirgin uzamsal heterojenlik sergileyen doğal gıda

sistemleridir; bu heterojen yapı, görüntüde hem doku, hem de optik tepkilerin bölgeden bölgeye değişmesine yol açar (Christensen, Nørgaard, Bro, & Engelsen, 2006; Oto et al., 2013). Et sistemlerinde otofloresans görüntüleme ile yağ ve bağ dokusunun incelenebildiği raporlanmıştır. Bu bileşenlerin görüntüde ayırt edilebilir ancak aynı zamanda değişken bir dağılım gösterdiği belirtilmektedir (Christensen et al., 2006; Oto et al., 2013). Benzer biçimde, et ürünlerinde kalite değerlendirmesinde görüntüleme ile kemometri yaklaşımlarının kullanılabilmesi, görsel ölçümlerin ürün matrisindeki karmaşık yapısal farklılıklara duyarlı olduğunu göstermektedir (ElMasry, Iqbal, Sun, Allen, & Ward, 2011).

Bu yapısal heterojenlik, yalnızca ürün sınıfı belirleme değil, özellikle nesne tespitinde gereken sınır ayrımı ve lokal anomali bulma performansını doğrudan etkiler; çünkü aynı görüntü içinde farklı kas lif yönelimleri ve doku örüntüleri, modelin arka plan ve ön plan ayrımını zorlaştırabilecek yüksek frekanslı doku bileşenleri üretebilir (Perán-Sánchez et al., 2019). Örneğin Iberian jambonunda dijital görüntü filtreleme optimizasyonu ve fraktal boyut gibi doku tanımlayıcılarının kalite kestiriminde kullanılabilmesi, et dokusunun çok-ölçekli bir yapısal karaktere sahip olduğunu göstermektedir (Perán-Sánchez et al., 2019). Derin öğrenmenin hiyerarşik katmanlarla yüksek düzey temsiller öğrenerek karmaşık örüntüleri modelleyebilmesi, bu tür heterojen dokulu verilerde neden tercih edildiğini açıklayan genel kuramsal çerçeveyi sunmaktadır (Zhao et al., 2019).

2.2. Tür, Kesim, Ürün Formu ve Proses Koşullarına Bağlı Görünüm Değişkenliği

Et görüntülerinde değişkenlik yalnızca anlık doku heterojenliğinden değil; ürünün formu, proses ve depolama koşulları gibi faktörlerin görsel özellikleri sistematik biçimde

değiştirmesinden de kaynaklanmaktadır (ElMasry et al., 2011; Kritsi et al., 2024). Örneğin, depolama süresince pastırma örneklerinde renk canlılığının azalması ve tekstürel bütünlüğün düşmesi gibi değişimler raporlanmış; bu değişimlerin görüntü analiziyle depolama süresine göre sınıflamayı mümkün kıldığı gösterilmiştir (Kritsi et al., 2024). Bu bulgular, görsel ipuçlarının kalite-bozulma ile ilişkili olabildiğini; ancak aynı zamanda proses ve depolama etkileri nedeniyle görsel dağılımların zamanla kaydığını düşündürmektedir (Kritsi et al., 2024).

Ayrıca, et endüstrisinde kalite ve güvenlik değerlendirmesi için bilgisayarlı görü, spektroskopi ve hiper/multi-spektral görüntüleme gibi tahribatsız yaklaşımların birlikte anılması, tekil bir görüntü kanalının (ör. RGB) her senaryoda yeterli bilgi taşımayabileceğine işaret etmektedir (Khaled et al., 2021). Nitekim hiperspektral görüntüleme ile hindi jambonlarında kalite sınıflandırması yapılabilmesi, et ürünlerinde görünümün yalnız renk değil, daha geniş optik özellikler üzerinden daha kararlı temsil edilebileceğini göstermektedir (ElMasry et al., 2011). Bu bağlam, uygulamada sık görülen farklı kamera, farklı ışık, farklı ürün formu kaynaklı alan kaymalarına karşı daha dayanıklı temsil arayışını gerekçelendirmektedir (Khaled et al., 2021).

2.3. Optik Ölçüm Koşullarına Duyarlılık

Et yüzeyi gibi biyolojik materyallerin görüntülenmesinde elde edilen sinyal, genel olarak malzemenin optik özelliklerinden (yansıma/emisyon) türediği için, aydınlatma ve ölçüm geometrisi gibi faktörlere duyarlıdır (B. Park, Lawrence, Windham, & Smith, 2006). Hiperspektral görüntülemenin, görüntüleme ve spektroskopi birleşimi olarak ele alınması ve gıda kalite-güvenlik denetiminde kullanılması, ölçümlerin optik özelliklere dayalı olduğuna işaret eder (B. Park et al., 2006). Et endüstrisinde akıllı kontrol sistemleri ve gerçek zamanlı izleme vurgusu yapılırken,

yaygınlaşmanın önündeki engeller arasında standardizasyon eksikliği ve uygulama maliyeti gibi unsurların sayılması, optik tabanlı sistemlerin sahaya aktarımında donanım ve kurulum parametrelerinin yönetilmesi gerekliliğiyle uyum göstermektedir (Sun et al., 2025).

Bu nedenle et görüntülerinde nesne tespiti geliştirirken, görüntülerin yalnızca içerik açısından değil, aynı zamanda edinim koşulları nedeniyle de değişken bir dağılıma sahip olabileceği; bunun da veri toplama ve model doğrulama tasarımını zorlaştıracığı kabul edilmektedir (Khaled et al., 2021). Büyük ölçekli görsel tanıma ölçütlerinin (örn. ImageNet) veri etiketleme süreçlerinde zorluğun vurgulanması, et gibi karmaşık görsel dokularda da benzer biçimde veri-etiket kalitesinin nesne tespit başarımını belirleyen kritik bir unsur olacağını düşündürmektedir (Russakovsky et al., 2015).

2.4. Çok Faktörlü Kalite Değişimi

Et ürünlerinde depolama boyunca renk ve doku özelliklerinin değiştiği; aynı zamanda nem, tekstür, oksidasyon göstergeleri gibi çoklu kalite ölçütleriyle birlikte anlam kazandığı raporlanmıştır (Kritsi et al., 2024). Pastırma örneklerinde görüntü analizinin depolama süresini sınıflayabilmesi, görüntünün güçlü bir sinyal taşıyabildiğini gösterirken; aynı çalışmada nem ve oksidasyonla ilişkili ölçütlerdeki farklılıkların da kalite değişimiyle birlikte seyrettiğinin belirtilmesi, görsel ipuçlarının tek bir boyuta indirgenmemesi gerektiğini desteklemektedir (Kritsi et al., 2024). Benzer şekilde, et kalite ve güvenliğinde bilgisayarlı görü ile birlikte spektroskopi hiper/multi-spektral gibi yöntemlerin tahribatsız değerlendirme şemsiyesi altında birlikte değerlendirilmesi, tekil renk ölçümlerine kıyasla daha zengin bilgi kaynaklarının pratikte tercih edilebildiğini göstermektedir (Khaled et al., 2021).

Bu durum, nesne tespit sistemlerinin yalnızca renk eşikleme gibi basit yaklaşımlara dayanması hâlinde genellenebilirliğin sınırlanabileceğine; bunun yerine doku temsilleri, çok-bantlı bilgi veya öğrenilmiş derin özelliklerin daha uygun olabileceğine işaret etmektedir (Perán-Sánchez et al., 2019). Nitekim derin öğrenmenin çok katmanlı temsillerle örüntüleri sınıflandırma veya tahmin etmesi ve bilgisayarlı görü görevlerinde yaygınlaşması, renk-dışı ipuçlarının da otomatik öğrenilerek modele katılabilmesine olanak sağlamaktadır (Zhao et al., 2019).

2.5. Yabancı Madde/Defekt Gibi Lokal Anomaliler

Gıda endüstrisinde kontaminasyon ve taşıyıcı tespiti gereksiniminin yaygın oluşu; bu nedenle hızlı, etiket gerektirmeyen ve temassız tekniklere ihtiyaç duyulması, et görüntülerinde hedef nesnelerin çoğu zaman lokal anomali formunda ortaya çıkabileceğini (küçük alan kaplama, düzensiz şekil, düşük kontrast) düşündürmektedir (Lopes et al., 2019). Bu tür hedefler, nesne tespitinin yalnız sınıflandırma değil aynı zamanda konumlandırma gerektiren doğası nedeniyle, modelin uzamsal duyarlılığını artıran mimari ve eğitim stratejilerine ihtiyaç duymaktadır (Litjens et al., 2017). Tespit problemlerinde ölçüt veri kümelerinin nesne tespiti için etiketlenmenin zorluğunu tartışması, küçük ve düzensiz nesnelerin etiketleme maliyetini ve hata riskini artırarak et uygulamalarında veri hazırlama sürecini daha kritik hâle getirebileceğini göstermektedir (Russakovsky et al., 2015).

Et özelinde, gömülü donanım üzerinde derin CNN'lerle kalite kestirimi gibi uygulamaların mümkün olduğunun gösterilmesi, sahada gerçek zamanlı karar gereksinimi ile model karmaşıklığı arasında bir optimizasyon problemi bulunduğu işaret eder; küçük hedefleri yakalamaya çalışan daha ağır tespit modelleri ile hat üstü hız ve donanım kısıtları arasında gerilim

oluşabilmektedir (Kolosov et al., 2023). Bu nedenle endüstriyel senaryolarda, hedef nesne boyutu küçüldükçe artan çözünürlük ihtiyacı ve model hesap yükü, kurulum açısından temel bir mühendislik zorluğu oluşturmaktadır (Kolosov et al., 2023).

2.6. Ölçek, Çeşitlilik ve Güvenilirlik

Et görüntülerinde heterojenlik ve proses, edinim değişkenliği, yüksek çeşitliliğe sahip veri gerektirir; bu da büyük ölçekli, iyi etiketlenmiş veri kümeleri oluşturmayı güçleştirmektedir (Russakovsky et al., 2015). Büyük ölçekli görsel tanıma literatüründe, nesne tespiti için veri etiketleme zorluğunun özellikle vurgulanması; et gibi sınıf içi varyansı yüksek alanlarda benzer şekilde kapsamlı etiketlemenin maliyetli olacağını desteklemektedir (Russakovsky et al., 2015). Et kalite-güvenlik değerlendirmesinde hızlı ve tahribatsız yöntemlere yönelim olsa da, bu sistemlerin güvenilirliği için ölçüm protokolleri ve model doğrulama süreçlerinin titizlikle ele alınması gerektiği; tahribatsız yaklaşımların uygulama kısıtlarına sahip olduğu rapor edilmiştir (Khaled et al., 2021).

Ayrıca, uygulamalarda yapay zekaya olan güven ve benimsenme süreci, yapay zekânın çıkarımlarına ilişkin kararlarının açıklanabilirliği önem taşır. Bu sebeple uzmanların güvenini kazanmak için yorumlanabilirlik yöntemlerine ihtiyaç olduğu vurgulanmaktadır (Reyes et al., 2020). Bu gereksinim, et endüstrisinde akıllı kontrol, tazelik tanıma ve kalite güvence uygulamalarının yaygınlaşması hedefleriyle birlikte düşünüldüğünde, nesne tespit çıktılarının yalnız doğru değil, aynı zamanda denetim süreçlerine entegre edilebilir ve kullanıcıya açıklanabilir olması gereğini güçlendirir (Sun et al., 2025).

3. ET GÖRÜNTÜLERİNDE NESNE TESPİTİ KAVRAMI

3.1. Tanım ve Problem Çerçevesi

Nesne tespiti, bir görüntüdeki hedef nesneleri hem sınıflandırmayı (hangi sınıfa ait oldukları) hem de konumlandırmayı (ör. sınırlayıcı kutu/bölge) eş zamanlı gerçekleştiren temel bir bilgisayarlı görü problemi (Chamier et al., 2021; Z. Chen, Zhang, & Ouyang, 2018). Bu görev, görüntü sınıflandırmadan farklı olarak yalnızca “ne var?” sorusunu değil, aynı zamanda “nerede?” sorusunu da yanıtlamak zorunda olduğundan; veri etiketleme, modelleme ve değerlendirme bakımından daha karmaşık bir yapıya sahiptir (Chamier et al., 2021). Derin öğrenme literatüründe nesne tespiti, sınıflandırma ve segmentasyon gibi görevlerle birlikte, evrimsel sinir ağlarının (CNN) yaygın biçimde uygulandığı ana problem ailelerinden biri olarak ele alınmaktadır (Chamier et al., 2021; Ren, He, Girshick, & Sun, 2017).

Et ve et ürünleri bağlamında nesne tespiti yaklaşımı, tahribatsız kalite ve güvenlik değerlendirme yöntemleri arasında yer alan bilgisayarlı görü tabanlı denetimin doğal bir uzantısıdır (Khaled et al., 2021; Sun et al., 2025). Et endüstrisinde dijital dönüşüm uygulamalarında ürün kalitesi ve güvenliğinin artırılması hedeflenirken; gerçek zamanlı izleme ve otomatik kalite kontrol senaryolarının öne çıktığı vurgulanmaktadır (Khaled et al., 2021; Sun et al., 2025). Bu nedenle nesne tespiti, et yüzeyinde veya ürün formunda ortaya çıkabilecek kritik kusur ve uygunsuzlukların otomatik tespiti için, tahribatsız muayeneyi karar destek sistemlerine bağlayan bir mekanizma olarak konumlanmaktadır (Khaled et al., 2021; Sun et al., 2025).

3.2. Et Uygulamalarında Nesne Tespitinin Hedefleri

Et kalite ve güvenliğinin değerlendirilmesinde elektronik burun, bilgisayarlı görü ve hiper/multi-spektral görüntüleme gibi

tahribatsız yaklaşımların yoğun biçimde incelenmiş olması, et ürünlerinde hızlı ve temasız denetimin önemini göstermektedir (Khaled et al., 2021). Bu tahribatsız çerçevede nesne tespiti; örneğin yüzey kontaminasyonu gibi güvenlik riskleri veya proses kaynaklı kusurların görüntü üzerinden yerleştirilerek belirlenmesini sağlayabildiği için, yalnız sınıf üretmekten daha işlevsek bir çıktı sunmaktadır (Chamier et al., 2021; Z. Chen et al., 2018). Gıda işleme endüstrisinde kontaminasyon ve taşıyıcı gibi risklerin hızlı ve tahribatsız biçimde tespit edilmesine duyulan ihtiyaç, görsel denetim tabanlı otomasyonun motivasyonunu güçlendirmektedir (Khaled et al., 2021; Sun et al., 2025).

Et endüstrisinin yüksek verimli üretim ve tedarik zinciri bağlamında akıllı kontrol sistemlerine yönelmesi; gerçek zamanlı izleme, kalite güvence ve güvenlik hedefleriyle uyum göstermektedir (Sun et al., 2025). Ayrıca, sensör teknolojileri ve yapay zekadaki ilerlemelerin et gibi ürünlerde otomatik kalite değerlendirmesine olanak verdiği; bu tür çözümlerin laboratuvar temelli, zaman alıcı analizlere bağımlılığı azaltma potansiyeli taşıdığı ifade edilmiştir (Sun et al., 2025). Bu bağlamda nesne tespiti, özellikle görsel olarak lokalize edilebilen uygunsuzlukların (ör. belirli bölgelerdeki anomali desenleri) hızlı ayıklanmasına dönük endüstriyel kullanım senaryolarıyla doğrudan ilişkilendirilmektedir (Kolosov et al., 2023; Sun et al., 2025).

3.3. Klasik Yaklaşımlar ve Derin Öğrenmeye Geçişin Gerekçesi

Görüntü analizinin et kalite karakteristiklerini değerlendirmede hızlı, tahribatsız ve tekrarlanabilir bir yöntem olarak ele alınması, geleneksel el ile tasarlanmış özellik çıkarımına dayalı bilgisayarlı görü hatlarının uzun süredir uygulamada yer bulduğunu göstermektedir (Khaled et al., 2021;

Sun et al., 2025). Bununla birlikte, et ürünlerinde yapı ve görünüm değişkenliğinin yüksek olması; kalite/güvenlik sinyallerinin yalnızca tek bir basit görsel ipucuna indirgenememesi (ör. farklı koşullarda farklı doku/reng davranışı) nedeniyle, daha güçlü temsil öğrenme yöntemlerine ihtiyaç doğurur (Chamier et al., 2021; Khaled et al., 2021). Nitekim hiperspektral görüntülemenin et ürünlerinde çoklu kalite özelliklerini (ör. doku/reng ile ilişkili nitelikler) modelleyebilmesi, özellik tasarımının tek kanallı ve basit sezgilerle sınırlı kalmasının pratikte yetersiz olabileceğine işaret etmektedir (Chamier et al., 2021; Khaled et al., 2021).

Derin öğrenme, çok katmanlı hiyerarşik mimarilerle veriden yüksek düzey temsiller öğrenerek örüntü sınıflandırma ve tahmin problemlerinde güçlü performans sergileyen bir yaklaşım olarak tanımlanmıştır (Ren et al., 2017). Bu yaklaşımın bilgisayarlı görüde yaygın biçimde benimsenmesi ve nesne tespiti gibi görevlerde temel yöntem ailesi haline gelmesi, et görüntülerinde karmaşık doku ve kontrast değişimleri altında daha esnek ve genellenebilir özellikler öğrenme beklentisini desteklemektedir (M. Li, Zhang, Lei, Wang, & Guo, 2020). Ayrıca büyük ölçekli görsel tanıma değerlendirmelerinin nesne sınıflandırma ve tespit alanındaki ilerlemeyi hızlandırdığı; böylece derin öğrenme tabanlı tespit yöntemlerinin olgunlaşmasına katkı sunduğu gösterilmiştir (M. Li et al., 2020).

4. DERİN ÖĞRENME TABANLI NESNE TESPİTİ YAKLAŞIMLARI

4.1. Doğruluk–Maliyet Dengesi

İki aşamalı dedektörlerin tipik temsilcilerinden Faster R-CNN, bölge öneri ağı (RPN) ile aday bölgeler üretip ardından bu bölgelerde sınıflandırma ve kutu iyileştirme yaparak tespit gerçekleştirir. Bu mimari, önce nerede bakmalı, sonra ne

olduğuna karar vermeli kurgusunu birleştirmektedir (Ren et al., 2017). Bu tür iki aşamalı yapılar, özellikle doğru yerleştirme ve yüksek doğruluk hedeflendiğinde güçlü bir seçenek olarak literatürde merkezi konumdadır (M. Li et al., 2020; Ren et al., 2017). Öte yandan iki aşamalı yaklaşımın getirdiği hesaplama ve gecikme maliyetleri, hat üstü kalite kontrol gibi yüksek hız gerektiren senaryolarda pratik sınırlılıklara yol açabilmektedir; gerçek zamanlılık gereksinimi, model seçimini yalnız doğruluk değil hız ve donanım kısıtları üzerinden de belirlemeyi gerekli kılmaktadır (Sun et al., 2025).

Et endüstrisinde dijital dönüşüm vizyonu oldukça önemlidir. Çünkü yüksek verimli üretim ve gerçek zamanlı izleme senaryolarında çözümlerin ölçeklenmesi, maliyet ve standardizasyon gibi engellerle birlikte hesaplama altyapısı gereksinimleri tarafından da şekillenir (Sun et al., 2025). Ayrıca, gömülü donanım üzerinde derin CNN'lerle et kalitesine ilişkin kestirim yapılabilirdiğinin gösterilmesi, tespit ve analiz modellerinin yalnız teorik doğruluk değil uygulanabilirlik kriterleriyle değerlendirilmesi gerektiğini destekler (Sun et al., 2025).

4.2. Hız Odaklı Tespit Mekanizması

Tek aşamalı dedektörler, aday bölge üretimi gibi ara adımları azaltarak tespiti daha doğrudan bir biçimde gerçekleştirmeyi hedefler ve bu sayede gerçek zamanlı uygulamalarda sıklıkla tercih edilmektedir (Z. Chen et al., 2018). Örneğin YOLO ailesi, hız avantajıyla bilinen tek aşamalı yaklaşımların güçlü bir örneğidir. YOLOv3'ün farklı giriş çözünürlüklerinde hızlı çalışırken anlamlı doğruluk (mAP) sağladığı rapor edilmiştir (Redmon & Farhadi, 2018). Bu tür hız–doğruluk dengesi, yüksek bant hızına sahip endüstriyel hatlarda kararın gecikmesini sınırlama ihtiyacıyla uyumlu bir tasarım

motivasyonuna karşılık gelir (Khaled et al., 2021; Sun et al., 2025).

Tek aşamalı ve iki aşamalı modellerin karşılaştırmalı değerlendirmeleri, yalnızca et özelinde değil farklı görüntü alanlarında da (örn. yüksek çözünürlüklü uydu görüntülerinde nesne tespiti) hız ve doğruluğun birlikte tartışıldığı bir metodolojik çerçeve sunar (M. Li et al., 2020). Bu karşılaştırmalı çerçeve, et görüntülerinde de benzer şekilde; hedef nesnelerin boyutu, görüntü kalitesi ve donanım kısıtlarına göre dedektör ailesi seçiminde sistematik bir yaklaşım gerektirdiğini düşündürmektedir (Khaled et al., 2021; M. Li et al., 2020).

5. ET GÖRÜNTÜLERİNE ÖZGÜ MODEL UYARLAMALARI VE TASARIM İHTİYAÇLARI

5.1. Küçük/Düzensiz Hedefler ve Çok-Ölçekli Temsil Gereksinimi

Gıda denetimi bağlamında kontaminasyon ve taşıyıcı tespiti ihtiyacının yaygın oluşu, hedeflerin çoğu zaman görüntüde küçük alan kaplayan ve düzensiz görünümlü anomaliler olarak belirebileceğini göstermektedir (Khaled et al., 2021). Bu tip hedefler nesne tespitinde çok-ölçekli temsil ve hassas yerleştirme gereksinimini artırır. Zira tespit görevi, doğası gereği hem sınıf tahmini hem de konum tahmini üretmektedir (Z. Chen et al., 2018; M. Li et al., 2020). Bu nedenle, et uygulamalarında küçük kusurların yakalanması için dedektörlerin ölçek duyarlılığı, çözünürlük stratejileri gibi çok-ölçekli tasarım ilkeleri pratikte belirleyici hâle gelebilir. Farklı alanlarda ölçek ve özellik birleştirme mantığıyla geliştirilen tespit ağlarının varlığı, bu gereksinimin genel bilgisayarlı görüş literatüründe de tanındığını göstermektedir (Z. Chen et al., 2018; Zhang, Cao, & Chen, 2020).

Et ürünlerinde görüntü dokusunun çeşitli tanımlayıcılarla kalite kestirimine konu olması, et yüzeyinin çok-ölçekli yapısal karakter taşıdığına işaret eder. Bu durum da küçük hedeflerin arka plan dokusu içinde kaybolma riskini artırabilir (Perán-Sánchez et al., 2019). Dolayısıyla et görüntülerinde nesne tespiti, yalnızca nesne var/yok ayırımından çok, dokuya gömülü küçük anomalilerin ayırt edilmesi gibi daha zor bir görsel ayırım problemine dönüşebilir. Bu zorluk, nesne tespiti ve segmentasyon gibi görevlerin derin öğrenme ile ele alınmasının nedenlerini tartışan çoğu araştırmada gösterilmiştir (Chamier et al., 2021; Z. Chen et al., 2018).

5.2. Mimari Bileşenler

Transfer öğrenme görsel görevlerde öğrenilen özelliklerin belirli ölçüde evrensel olabildiği ve farklı nesne tespiti problemlerine sınırlı ayarla aktarılabilirdiği öğrenme olup bu yaklaşımın “transfer learning” olarak kullanıldığı rapor edilmiştir (M. Li et al., 2020; Waithe et al., 2020). Bu, et görüntülerinde veri kısıtlarının bulunabileceği senaryolarda (özellikle nadir kusurların yeterince temsil edilemediği durumlarda) pratik bir strateji olarak önem kazanır; çünkü ön-eğitilmiş ağlar, sınırlı etiketli veriyle daha kararlı eğitim sağlayabilir (Russakovsky et al., 2015; Waithe et al., 2020). ResNet daha derin mimarilerde optimizasyonu kolaylaştırdığı ve ImageNet gibi büyük ölçekli veri kümelerinde güçlü sonuçlar verdiği gösterildiğinden, yaygın kullanımı da bu tür aktarım senaryolarını teknik olarak destekler (He, Zhang, Ren, & Sun, 2016; Russakovsky et al., 2015).

Ayrıca, nesne tespitinin uzun süredir temel ve zor bir problem olarak ele alınması ve Faster R-CNN gibi yapılar üzerinde ağların özel olarak tasarlanması/iyileştirilmesi, tespit performansının önemli bir kısmının temsil gücüne bağlı olduğunu göstermektedir (F. Li et al., 2024; Ren et al., 2017). Et uygulamalarında yağ-kas gibi görsel geçişlerin düşük kontrastlı

olabildiği veya dokunun heterojen olabildiği dikkate alındığında, ağın ayrıştırıcı özellik öğrenme kapasitesi, yerleştirme doğruluğu kadar kritik hâle gelebilir (Y. Chen, Jiang, Li, Jia, & Ghamisi, 2016; Z. Chen et al., 2018).

6. VERİ SETLERİ VE VERİ HAZIRLAMA SÜRECİ

6.1. Etiket ve Değerlendirme Zorlukları

Nesne tespiti için güvenilir etiketlenmiş veri oluşturmak, sınıflandırmaya kıyasla daha maliyetli ve hata riskine açık bir süreçtir. Büyük ölçekli değerlendirme girişimlerinin (ImageNet) nesne tespiti için veri kümesi oluşturma ve etiketleme süreçlerini ayrıntılı biçimde tartışması, bu zorluğun alan genelinde kabul edildiğini gösterir (Russakovsky et al., 2015). Et ve et ürünlerinde tahribatsız kalite ve güvenlik değerlendirmesi hedefiyle görüntüleme tabanlı yöntemlerin kullanılması, pratikte standartlaştırılmış veri toplama protokolleri ve güvenilir doğrulama düzenekleri gerektirir. Aksi hâlde edinim koşullarındaki farklılıklar, modelin genellenebilirliğini düşürebilir (Khaled et al., 2021; Sun et al., 2025). Bu bağlamda veri hazırlama süreci, yalnız veri sayısını artırmayı değil, aynı zamanda edinim koşullarını (kamera/ışık/ürün varyasyonu) kapsayacak şekilde çeşitlendirmeyi de içermelidir. Bu gereklilik, et endüstrisinde standardizasyon eksikliği gibi engellerin vurgulanmasıyla uyumludur (Khaled et al., 2021; Sun et al., 2025).

6.2. Veri Artırma ve Genellenebilirlik

Derin öğrenmenin görüntülerden ilgili özellikleri bağımsız biçimde çıkarabilmesi ve klasik görüntü işleme stratejilerini aşan performans gösterebilmesi, veri artırma ve transfer öğrenmesi gibi pratik eğitim stratejileriyle birlikte

düşünülmektedir (Chamier et al., 2021; Waithe et al., 2020). Nitekim transfer öğrenmesi ile farklı nesne türlerine uyarlanabilen dedektörlerin gösterilmesi, et görüntülerinde de farklı ürün tipleri ve koşulları arasında genellenebilirlik için veri artırma/ince ayar pratiklerinin önemini destekler (M. Li et al., 2020; Waithe et al., 2020). Et endüstrisinde gömülü sistemler ve gerçek zamanlı izleme senaryolarında, veri artırma ve model sıkıştırma/hız optimizasyonu gibi mühendislik yaklaşımları da dolaylı olarak dağıtım başarısını etkileyen bileşenler hâline gelir (Khaled et al., 2021; Sun et al., 2025).

7. ET VE ET ÜRÜNLERİNDE UYGULAMA ALANLARI

7.1. Fiziksel Kusur ve Bozulma Tespiti

Et ve et ürünlerinde bozulma depolama süresi ilerledikçe artış gösterir. Görünür olarak bozulma, ürün yüzeyindeki renk canlılığının azalması ve tekstürel bütünlüğün düşmesi gibi değişimlerle birlikte seyredebilmektedir. Bu durumun görüntü analizi ile depolama süresine göre örneklerin sınıflanmasını mümkün kıldığı gösterilmiştir (Khaled et al., 2021). Bu bulgular, et görüntülerinde bozulma belirtisinin çoğu zaman belirli bir bölgeye lokalize olabilen görsel ipuçları üzerinden yakalanabileceğini ve bu nedenle yerleştirme gerektiren nesne tespiti ve segmentasyon gibi bilgisayarlı görü yaklaşımlarının kalite kontrol iş akışlarına anlamlı katkı sunabileceğini destekler (Khaled et al., 2021; Sun et al., 2025). Nitekim et kalite ve güvenliği için tahribatsız değerlendirme yaklaşımlarının (bilgisayarlı görü, spektroskopi, HSI/MSI vb.) sistematik olarak ele alındığı çalışmalarda, hızlı ve temassız yöntemlere duyulan ihtiyaç açık biçimde vurgulanmaktadır (Barbon et al., 2018; Sun et al., 2025).

Bozulmanın yalnızca tek bir görsel kanalla yakalanmasının her zaman yeterli olmaması nedeniyle, hiperspektral görüntüleme (HSI) gibi yöntemlerin et ürünlerinde çeşitli kalite özelliklerini değerlendirmede başarıyla kullanıldığı bilinmektedir. Yapılan bir çalışmada araştırmacılar pişmiş/dilimlenmiş hindi jambonları NIR-HSI kullanılarak kalite sınıflaması gerçekleştirilmişlerdir (Alvarez-García et al., 2024). Bu yaklaşım, bozulma ve kusurun görüntüde düşük kontrastlı veya heterojen dokuyla iç içe geçtiği durumlarda, salt renk yerine daha zengin optik/spektral bilginin modellemeyi destekleyebileceğini göstermektedir (Alvarez-García et al., 2024; Sun et al., 2025). Et endüstrisinin dijital dönüşüm vizyonunda gerçek zamanlı izleme ve kalite-güvenlik iyileştirmeleri hedeflendiğinden, bozulma/kusur tespitinin otomatikleştirilmesi endüstriyel dönüşümün doğal bir bileşeni olarak tartışılmaktadır (Barbon et al., 2018; Sun et al., 2025).

7.2. Yabancı Madde ve Kontaminasyon Tespiti

Gıda işleme endüstrisinde kontaminasyon ve taşıyıcı gibi risklerin hızlı, etiket gerektirmeyen ve temassız bir biçimde tespit edilmesine yönelik gereksinim, görüntü temelli otomasyon çözümlerinin temel motivasyonlarından biri olarak ifade edilmiştir (Lopes et al., 2019). Bu çerçevede, kontaminasyonun erken aşamada saptanması için görüntüleme ve yapay zekâ bileşenlerinin birlikte kullanıldığı uygulamalar dikkat çekmektedir. Örneğin floresans görüntüleme (fluorescence imaging) ile derin öğrenmeyi birleştirerek et karkas yüzeylerinde fekal kontaminasyonun önce kare düzeyinde ayırt edilmesi, ardından kontaminasyon bölgelerinin segmentasyonla belirlenmesi gösterilmiştir (Gorji et al., 2022). Bu yaklaşım, kontaminasyonun çoğu zaman küçük veya düzensiz bölgesel hedef yapısında olduğunu ve bu nedenle yerleştirme çıktısının denetim kararlarını doğrudan eyleme bağlayabildiğini destekler (Gorji et al., 2022; Sun et al., 2025).

HSI'nın gıda güvenliği denetiminde fekal kontaminant gibi hedeflerin tespitinde kullanıldığı; optik özelliklere dayalı görüntüleme-spektroskopi birleşiminin gıda kalite/güvenlik otomasyonunda tarihsel olarak geliştirildiği rapor edilmiştir (Kolosov et al., 2023). Benzer biçimde, tavuk eti güvenliği/kalite değerlendirmesinde HSI'nın bozulma, kirlilik ve hastalık tespiti gibi başlıklarda ele alındığı çalışmalar mevcuttur (Fu & Chen, 2019). Bu kaynaklar, kontaminasyon/yabancı madde tespitinin yalnız RGB görüntüye bağlı kalmadan, uygun donanım ve yazılım bileşenleriyle desteklenebileceğini; ancak sistemlerin çoğu zaman belirli problemlere özelleştiğini göstererek genelleme ve saha uyarlaması ihtiyacını da göstermektedir (Fu & Chen, 2019; Kolosov et al., 2023).

Veri gizliliği veya kurumlar arası veri paylaşım kısıtlarının bulunduğu durumlarda, dağıtık öğrenme (federated learning) gibi yaklaşımlar ile kontaminasyon bölgelerinin segmentasyonunda oldukça başarılı performans sonuçları gösterilmiştir (Gorji et al., 2023). Bu, et ve et ürünleri tedarik zincirinde ve çok tesisli üretimde verinin merkezi toplanamadığı durumlarda, kontaminasyon tespiti modellerinin dağıtık öğrenme paradigmasıyla geliştirilebileceğine dair doğrudan bir örnek sunmaktadır (Gorji et al., 2023; Sun et al., 2025).

7.3. İzlenebilirlik, Etiketleme, Sahtecilik ve Tağşiş

Et ürünlerinde tür ikamesi (species substitution) ve yanlış etiketleme, izlenebilirlik ve tüketici güveni açısından kritik bir risk alanıdır. Güney Afrika'da satılan et ürünlerinde yüksek oranda doku karışımı ve yanlış etiketlemenin raporlanması, tür tanımlamanın gıda kontrolünde önemli bir uygulama alanı olduğunu göstermektedir (Cawthorn, Steinman, & Hoffman, 2013). Ayrıca işlenmiş et ürünlerinde multiplex PCR ile birden fazla et türünün eşzamanlı tanımlanabildiği; ucuz kanatlı etlerinin (ör. tavuk/ördek) daha pahalı ürünlere tağşiş yoluyla karışabildiği

rapor edilmiştir (Cai et al., 2021). Bu iki çalışma birlikte değerlendirildiğinde, tür tanımlama probleminin pratikte yaygın olabildiği ve yalnız görsel muayenenin her zaman yeterli olmayabileceği anlaşılmaktadır (Cai et al., 2021; Cawthorn et al., 2013).

Bununla birlikte, et endüstrisinde sensörler ve yapay zekâ temelli değerlendirme yaklaşımlarının izlenebilirlik süreçleriyle birlikte ele alındığı; bilgisayarlı görüntü analizinin hızlı ve tekrarlanabilir bir yöntem olarak et kalite parametrelerinin izlenmesi ve yerel piyasa izlenebilirliğine katkısı vurgulanmıştır (Alvarez-García et al., 2024). Dolayısıyla tür ve ürün kimliklendirme uygulamaları pratikte iki eksenle ilerleyebilir. İlk olarak moleküler doğrulama (ör. PCR) ile yüksek güvenilirlikli kimlik tayini (Cai et al., 2021) ve ikinci olarak da görüntüleme/sensör ve yapay zekâ ile hızlı sınıflama/izleme ve süreç entegrasyonu (Alvarez-García et al., 2024; Sun et al., 2025). Bu bütüncül bakış ile et endüstrisinin de arzulanan dijital dönüşüm hedefi yakalanabilmekte ve dolayısıyla kalite ve güvenliğin iyileştirilmesi de artmaktadır (Alvarez-García et al., 2024; Sun et al., 2025).

7.4. Mikrobiyolojik Kalite Kestirimi ve Tazelik İzleme

Et bozulmasının mikrobiyolojik boyutu için FTIR gibi spektroskopik tekniklerin makine öğrenmesi ile birleştirilerek mikrobiyal bozulmanın hızlı ve nicel tespitine yönelik yaklaşımlar rapor edilmiştir (Ellis, Broadhurst, Kell, Rowland, & Goodacre, 2002). Benzer şekilde, tavuk göğüs filetosunda depolama boyunca FTIR + kemometri ile gerçek zamanlı tazelik değerlendirmesinin hızlı, güvenilir ve doğru olabileceği sonucuna varılmıştır (Vasconcelos, Saraiva, & José, 2014). Tavuk burgerlerde FTIR ve MSI verileri farklı makine öğrenmesi modelleriyle kullanılarak mikrobiyolojik kalite değerlendirmesinde hassas sonuçlar verebileceği belirlenmiştir.

Ayrıca çoklu sensör/veri modlarının da kalite değerlendirmesinde pratik değer taşıdığını göstermektedir (Fengou, Liu, Roumani, Tsakanikas, & Nychas, 2022). Mikrobiyolojik kalite ölçümünün yalnız laboratuvar testlerine bağlı kalmadan hızlı analitik yöntemlerle desteklenebileceği ve yapay zekâ ile ilişkilendirilebileceği bildirilmiştir (Ellis et al., 2002; Fengou et al., 2022; Vasconcelos et al., 2014).

Görüntü tabanlı tarafta, gömülü donanım üzerinde derin CNN'lerle etin mikrobiyolojik kalite kestiriminin hedeflenmesi; düşük maliyetli, hızlı ve uzman personel ihtiyacını azaltmayı amaçlayan otomatik kalite değerlendirme yaklaşımı olarak sunulmuştur (Kolosov et al., 2023). Bu yaklaşım, et endüstrisinin gerçek zamanlı izleme ve akıllı kontrol hedefleriyle birlikte düşünüldüğünde, nesne tespitin (ör. görünür bozulma bölgeleri) ve kalite kestirim modellerinin (ör. mikrobiyal risk tahmini) tamamlayıcı işlevler üstlenebileceğine işaret etmektedir (Kolosov et al., 2023; Sun et al., 2025).

8. PERFORMANS DEĞERLENDİRME VE ÖLÇÜTLER

8.1. Yerelleştirme ve Tespit Performansı

Nesne tespiti görevinde performansın değerlendirilmesi, sınıflandırma doğruluğuna ek olarak yerelleştirme kalitesini de kapsamak zorundadır. Nesne tespitinin kategori belirleme ile birlikte nesne konumunu üretmesi de bu gereksinimi doğurur (Z. Chen et al., 2018). Bu nedenle literatürde mAP gibi ölçütlerin ve hız göstergelerinin birlikte raporlandığı; farklı dedektörlerin doğruluk-verimlilik dengesi üzerinden karşılaştırıldığı gösterilmiştir (M. Li et al., 2020). Örneğin YOLOv3'ün belirli giriş çözünürlüklerinde milisaniye ölçeğinde çalışırken mAP değerleri sunduğu rapor edilmiştir, bu da tek aşamalı dedektörlerin hız odaklı tasarımının pratik sonuçlarını

göstermektedir (Redmon & Farhadi, 2018). Benzer biçimde Faster R-CNN, YOLOv3 ve SSD'nin karşılaştırıldığı çalışmada mAP ve FPS gibi metriklerle hem doğruluk hem verimlilik üzerinden değerlendirme yapılmıştır (M. Li et al., 2020).

Segmentasyon veya piksel düzeyi yerleştirme senaryolarında ise IoU yaygın biçimde raporlanan bir yerleştirme ölçütüdür. Kontaminasyon bölgelerinin segmentasyonunda IoU skorlarının raporlanması bunun doğrudan bir örneğidir (Gorji et al., 2023). Ette kontaminasyon tespiti gibi uygulamalarda hem tespit hem de segmentasyon çıktıları kullanıldığında, IoU benzeri ölçütlerinin operasyonel anlamı artmaktadır (Gorji et al., 2023; Gorji et al., 2022). Bu durum et endüstrisinde, uygulamaların ölçeklenmesinde, standardizasyon ve maliyet gibi engellerin tartışılması, metrik raporlamasının yalnız akademik değil, saha kabulü için de tekrarlanabilir ve karşılaştırılabilir biçimde tasarlanması gereğine işaret eder (Barbon et al., 2018; Sun et al., 2025).

8.2. Yanlış Negatifler ve Gıda Güvenliği Riski

Gıda güvenliği uygulamalarında yanlış negatifler, yani riskli bir bölgenin temiz olarak kaçırılması, doğrudan güvenlik riskini büyütebilecek bir hata sınıfıdır. Bu nedenle değerlendirme tasarımında duyarlılık (recall) gibi ölçütlerin kritik önem taşıdığı bildirilmiştir (Gorji et al., 2022; Lopes et al., 2019). Nitekim fekal kontaminasyonun görüntüden ayırt edilmesi ve kontamine bölgelerin belirlenmesi hedefli bir sistemin gösterilmesi, problemde kaçırma hatalarının operasyonel maliyetini (güvenlik riski) dolaylı olarak görünür kılar (Gorji et al., 2022). Bu tür senaryolarda, derin öğrenme tabanlı sistemlerin doğru çalıştığından emin olunması ve uzman güveninin sağlanması gereği, yorumlanabilirlik yaklaşımlarının önemini vurgulayan çalışmalarla da örtüşmektedir (S. Park et al., 2023; Reyes et al., 2020).

9. GÜNCEL ÇALIŞMALARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

Et kalite ve güvenliğinde tahribatsız görüntüleme (CV/HSI/MSI) ve sensör tabanlı yaklaşımlar literatürde yoğun biçimde ele alınmakta; bu yöntemlerin hızlı değerlendirme potansiyelini desteklemektedir (Barbon et al., 2018; Sun et al., 2025). HSI'nin et ürünlerinde farklı kalite özelliklerini tahmin ve sınıflamada başarılı biçimde uygulanması (Alvarez-García et al., 2024) ve depolama boyunca görüntü analizi ile örneklerin depolama süresine göre sınıflanabilmesi (Khaled et al., 2021), görüntü tabanlı modellerin güçlü sinyal yakalayabildiğini göstermektedir (Alvarez-García et al., 2024; Khaled et al., 2021). Buna ek olarak, gömülü donanım üzerinde derin CNN'lerle et kalitesi kestirimi yaklaşımı, endüstriyel dağıtım yönünde hız ve maliyet hedefleriyle uyumlu bir doğrultuya işaret eder (Barbon et al., 2018; Kolosov et al., 2023).

10. SINIRLILIKLAR VE GELECEK PERSPEKTİFİ

10.1. Veri Yetersizliği, Etiket Maliyeti ve Dağıtım Kısıtları

Et ve et ürünlerinde görüntü tabanlı yapay zekâ uygulamalarının yaygınlaşması önünde, tahribatsız yöntemlerin sahaya aktarımında maliyet ve standardizasyon gibi engellerin bulunduğu; büyük ölçekli uygulamalarda bu zorlukların belirleyici olduğu vurgulanmıştır (Barbon et al., 2018; Sun et al., 2025). Nesne tespiti özelinde, yüksek kaliteli etiketleme zorluğu ve veri seti oluşturmanın maliyeti, büyük ölçekli görsel tanıma veri kümelerinin inşa sürecinde açık biçimde ortaya konmuştur (Russakovsky et al., 2015). Et görüntülerinde heterojen yapı ve edinim koşullarındaki çeşitlilik dikkate alındığında, veri setlerinin çeşitlendirilmesi ve etiketleme süreçlerinin

sistematikleştirilmesi saha genellenebilirliği için kritik görünmektedir (Barbon et al., 2018; Russakovsky et al., 2015).

Dağıtım açısından, gömülü donanım üzerinde derin öğrenme ile kalite kestirimi gibi örnekler, gerçek zamanlı ve düşük maliyetli çözümlerin mümkün olabileceğini gösterirken; aynı zamanda model karmaşıklığı–donanım kısıtı gerilimini de görünür kılar (Kolosov et al., 2023). Et endüstrisinde akıllı sistemlerin yaygınlaşmasının önündeki ekonomik/teknik engellerin tartışılması, nesne tespiti modellerinde yalnız doğruluk değil, bakım, kalibrasyon ve standart süreç yönetimi gibi saha gerekliliklerinin de belirleyici olacağını destekler (Barbon et al., 2018; Sun et al., 2025).

10.2. Açıklanabilirlik (XAI) ve Uzman Güveni

Derin öğrenme tabanlı sistemlerin kara kutu niteliği, uygulamada doğru çalıştıklarının güvence altına alınması ve uzman güveninin kazanılması açısından yorumlanabilirlik yöntemlerine ihtiyaç doğurur. Bu gereksinim özellikle yüksek riskli karar bağlamlarında bildirilmiştir (Reyes et al., 2020). XAI'nin yalnız performans değil kullanıcı deneyimi ile de ilişkili olduğu ve açıklanabilirliğin kullanıcı kabulü üzerinde etkisi olabileceği belirtilmiştir (S. Park et al., 2023). Derin öğrenmenin yüksek performansına karşın bazı hassas alanlarda yaygın kullanımının sınırlı kalması, açıklanabilirlik, güven ve uygulama kabulü boyutlarını öne çıkarmıştır (Singh et al., 2020). Et ve et ürünlerinde kalite-güvenlik denetiminin endüstriyel ölçekte benimsenmesi hedeflendiğinden, benzer şekilde nesne tespiti çıktılarının denetçi/operatör tarafından anlaşılabilir biçimde gerekçelendirilmesi, et endüstrisinin bu uygulamalara olan güveni artırabileceği düşünülmüştür (S. Park et al., 2023; Reyes et al., 2020; Sun et al., 2025).

10.3. Gelecek Yönelimleri

Et kalite ve güvenliğinde CV'nin HSI/MSI ve spektroskopi ile birlikte tahribatsız değerlendirme çatısı altında ele alınması, gelecekte tekil görüntü kanalından ziyade çoklu veri modalitelerinin (RGB + HSI/FTIR/MSI vb.) daha yaygın entegre edilebileceğini düşündürmektedir (Alvarez-García et al., 2024; Ellis et al., 2002; Sun et al., 2025). FTIR + kemometri ile tazelik/bozulma değerlendirmesinin hızlı ve güvenilir olabileceği gösterildiğinden, bu tip analitik sinyallerin görsel tespit sistemleriyle birlikte kullanılması çoklu-modal karar destek sistemlerine kapı aralayabilir (Fengou et al., 2022; Vasconcelos et al., 2014). Ayrıca dağıtık öğrenim ile kontaminasyon bölgelerinin yüksek IoU değerleriyle segmentasyonu örneği, veri paylaşım kısıtları altında dahi modellerin birlikte eğitilebileceğini göstererek; çok tesisli üretim/tedarik zinciri ortamlarına uyarlanabilir bir öğrenme stratejisi sunmaktadır (Barbon et al., 2018; Gorji et al., 2023). Tüm bu yönelimler, standardizasyon ve ölçeklenebilirlik engellerinin aşılmasına dönük olarak ölçüm protokollerinin ve değerlendirme raporlamasının (mAP/IoU/hız gibi metriklerle) daha sistematik hale getirilmesi gereğini güçlendirmektedir (Barbon et al., 2018; Gorji et al., 2023; M. Li et al., 2020).

KAYNAKÇA

- Alvarez-García, W. Y., Mendoza, L., Muñoz-Vílchez, Y., Nuñez-Melgar, D. C., & Quilcate, C. (2024). Implementing Artificial Intelligence to Measure Meat Quality Parameters in Local Market Traceability Processes. *International Journal of Food Science & Technology*, 59(11), 8058-8068. doi:10.1111/ijfs.17546
- Barbon, S., Ana Paula Ayub da Costa, B., Mantovani, R. G., & Barbin, D. F. (2018). Machine Learning Applied to Near-Infrared Spectra for Chicken Meat Classification. *Journal of Spectroscopy*, 2018, 1-12. doi:10.1155/2018/8949741
- Cai, Z., Zhou, S., Liu, Q., Ma, H., Yuan, X., Gao, J., . . . Pan, D. (2021). A Simple and Reliable Single Tube Septuple PCR Assay for Simultaneous Identification of Seven Meat Species. *Foods*, 10(5), 1083. doi:10.3390/foods10051083
- Cawthorn, D. M., Steinman, H. A., & Hoffman, L. C. (2013). A High Incidence of Species Substitution and Mislabelling Detected in Meat Products Sold in South Africa. *Food Control*, 32(2), 440-449. doi:10.1016/j.foodcont.2013.01.008
- Chamier, L. v., Laine, R. F., Jukkala, J., Spahn, C., Krentzel, D., Nehme, E., . . . Henriques, R. (2021). Democratising Deep Learning for Microscopy With ZeroCostDL4Mic. *Nature Communications*, 12(1). doi:10.1038/s41467-021-22518-0
- Chen, Y., Jiang, H., Li, C., Jia, X., & Ghamisi, P. (2016). Deep Feature Extraction and Classification of Hyperspectral Images Based on Convolutional Neural Networks. *Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 54(10), 6232-6251. doi:10.1109/tgrs.2016.2584107

- Chen, Z., Zhang, T., & Ouyang, C. (2018). End-to-End Airplane Detection Using Transfer Learning in Remote Sensing Images. *Remote Sensing*, 10(1), 139. doi:10.3390/rs10010139
- Christensen, J., Nørgaard, L., Bro, R., & Engelsen, S. B. (2006). Multivariate Autofluorescence of Intact Food Systems. *Chemical Reviews*, 106(6), 1979-1994. doi:10.1021/cr050019q
- Ellis, D. I., Broadhurst, D., Kell, D. B., Rowland, J. J., & Goodacre, R. (2002). Rapid and Quantitative Detection of the Microbial Spoilage of Meat by Fourier Transform Infrared Spectroscopy and Machine Learning. *Applied and Environmental Microbiology*, 68(6), 2822-2828. doi:10.1128/aem.68.6.2822-2828.2002
- ElMasry, G., Iqbal, A., Sun, D. W., Allen, P., & Ward, P. (2011). Quality Classification of Cooked, Sliced Turkey Hams Using NIR Hyperspectral Imaging System. *Journal of Food Engineering*, 103(3), 333-344. doi:10.1016/j.jfoodeng.2010.10.031
- Fengou, L.-C., Liu, Y., Roumani, D., Tsakanikas, P., & Nychas, G. J. E. (2022). Spectroscopic Data for the Rapid Assessment of Microbiological Quality of Chicken Burgers. *Foods*, 11(16), 2386. doi:10.3390/foods11162386
- Fu, X., & Chen, J. (2019). A Review of Hyperspectral Imaging for Chicken Meat Safety and Quality Evaluation: Application, Hardware, and Software. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 18(2), 535-547. doi:10.1111/1541-4337.12428
- Gorji, H. T., Saeedi, M., Mushtaq, E., Zadeh, H. K., Husarik, K., Shahabi, S. M., . . . Tavakolian, K. (2023). Federated

- Learning for Clients' Data Privacy Assurance in Food Service Industry. *Applied Sciences*, 13(16), 9330. doi:10.3390/app13169330
- Gorji, H. T., Shahabi, S. M., Sharma, A., Tande, L. Q., Husarik, K., Qin, J., . . . Tavakolian, K. (2022). Combining Deep Learning and Fluorescence Imaging to Automatically Identify Fecal Contamination on Meat Carcasses. *Scientific Reports*, 12(1). doi:10.1038/s41598-022-06379-1
- He, K., Zhang, X., Ren, S., & Sun, J. (2016). Deep Residual Learning for Image Recognition. 770-778. doi:10.1109/cvpr.2016.90
- Khaled, A. Y., Parrish, C. A., & Adedeji, A. A. (2021). Emerging Nondestructive Approaches for Meat Quality and Safety evaluation—A Review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 20(4), 3438-3463. doi:10.1111/1541-4337.12781
- Kolosov, D., Fengou, L.-C., Carstensen, J. M., Schultz, N., Nychas, G. J. E., & Mporas, I. (2023). Microbiological Quality Estimation of Meat Using Deep CNNs on Embedded Hardware Systems. *Sensors*, 23(9), 4233. doi:10.3390/s23094233
- Kritsi, E., Ladika, G., Stavropoulou, N. A., Oikonomakou, M., Ioannou, A.-G., Christodoulou, P., . . . Sinanoglou, V. J. (2024). Evaluation of the Quality Changes in Three Commercial Pastourma Samples During Refrigerated Storage Using Physicochemical, Microbiological, and Image Analyses Combined With Chemometrics. *Foods*, 13(7), 1017. doi:10.3390/foods13071017
- Li, F., Sun, T., Dong, P., Wang, Q., Li, Y., & Sun, C. (2024). MSF-CSPNet: A Specially Designed Backbone Network

- for Faster R-CNN. *Ieee Access*, 12, 52390-52399. doi:10.1109/access.2024.3386788
- Li, M., Zhang, Z., Lei, L., Wang, X., & Guo, X. (2020). Agricultural Greenhouses Detection in High-Resolution Satellite Images Based on Convolutional Neural Networks: Comparison of Faster R-Cnn, YOLO V3 and SSD. *Sensors*, 20(17), 4938. doi:10.3390/s20174938
- Litjens, G., Kooi, T., Bejnordi, B. E., Setio, A. A. A., Ciompi, F., Ghafoorian, M., . . . Sánchez, C. I. (2017). A Survey on Deep Learning in Medical Image Analysis. *Medical Image Analysis*, 42, 60-88. doi:10.1016/j.media.2017.07.005
- Lopes, J. F., Ludwig, L., Barbin, D. F., Grossmann, M. V. E., & Barbon, S. (2019). Computer Vision Classification of Barley Flour Based on Spatial Pyramid Partition Ensemble. *Sensors*, 19(13), 2953. doi:10.3390/s19132953
- Oto, N., Oshita, S., Makino, Y., Kawagoe, Y., Sugiyama, J., & Yoshimura, M. (2013). Non-Destructive Evaluation of ATP Content and Plate Count on Pork Meat Surface by Fluorescence Spectroscopy. *Meat Science*, 93(3), 579-585. doi:10.1016/j.meatsci.2012.11.010
- Park, B., Lawrence, K. C., Windham, W. R., & Smith, D. P. (2006). Performance of Hyperspectral Imaging System for Poultry Surface Fecal Contaminant Detection. *Journal of Food Engineering*, 75(3), 340-348. doi:10.1016/j.jfoodeng.2005.03.060
- Park, S., Kim, H. K., Park, J., & Lee, Y. (2023). Designing and Evaluating User Experience of an AI-Based Defense System. *Ieee Access*, 11, 122045-122056. doi:10.1109/access.2023.3329257

- Perán-Sánchez, F., Serrano, S., Ravé, E. G. d., Sánchez-López, E., Cumplido, A., & Jiménez-Hornero, F. J. (2019). Digital Image Filtering Optimization Supporting Iberian Ham Quality Prediction. *Foods*, 9(1), 25. doi:10.3390/foods9010025
- Redmon, J., & Farhadi, A. (2018). YOLOv3: An Incremental Improvement. doi:10.48550/arxiv.1804.02767
- Ren, S., He, K., Girshick, R., & Sun, J. (2017). Faster R-Cnn: Towards Real-Time Object Detection With Region Proposal Networks. *Ieee Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 39(6), 1137-1149. doi:10.1109/tpami.2016.2577031
- Reyes, M., Meier, R., Pereira, S., Silva, C. A., Dahlweid, F.-M., Tengg-Kobligk, H. v., . . . Wiest, R. (2020). On the Interpretability of Artificial Intelligence in Radiology: Challenges and Opportunities. *Radiology Artificial Intelligence*, 2(3), e190043. doi:10.1148/ryai.2020190043
- Russakovsky, O., Deng, J., Su, H., Krause, J., Satheesh, S., Ma, S., . . . Fei-Fei, L. (2015). ImageNet Large Scale Visual Recognition Challenge. *International Journal of Computer Vision*, 115(3), 211-252. doi:10.1007/s11263-015-0816-y
- Singh, A., Sengupta, S., & Lakshminarayanan, V. (2020). Explainable Deep Learning Models in Medical Image Analysis. *Journal of Imaging*, 6(6), 52. doi:10.3390/jimaging6060052
- Sun, Q., Hao, W., Xu, B., Gao, S., Zhai, X., Xu, F., & Shi, J. (2025). Innovative Technologies Reshaping Meat Industrialization: Challenges and Opportunities in the

Intelligent Era. *Foods*, 14(13), 2230.
doi:10.3390/foods14132230

Vasconcelos, H., Saraiva, C., & José, M. M. M. d. A. (2014). Evaluation of the Spoilage of Raw Chicken Breast Fillets Using Fourier Transform Infrared Spectroscopy in Tandem With Chemometrics. *Food and Bioprocess Technology*. doi:10.1007/s11947-014-1277-y

Waithe, D., Brown, J. M., Reglinski, K., Diez-Sevilla, I., Roberts, D. J., & Eggeling, C. (2020). Object Detection Networks and Augmented Reality for Cellular Detection in Fluorescence Microscopy. *The Journal of Cell Biology*, 219(10). doi:10.1083/jcb.201903166

Zhang, X., Cao, S., & Chen, C. (2020). Scale-Aware Hierarchical Detection Network for Pedestrian Detection. *Ieee Access*, 8, 94429-94439. doi:10.1109/access.2020.2995321

Zhao, R., Yan, R., Chen, Z., Mao, K., Wang, P., & Gao, R. X. (2019). Deep Learning and Its Applications to Machine Health Monitoring. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 115, 213-237.
doi:10.1016/j.ymssp.2018.05.050

ET VE ET ÜRÜNLERİNDE YAPAY ZEKÂ TABANLI TAHRİBATSIZ ANALİZ TEKNİKLERİ

Hasan İbrahim KOZAN¹

Hasan Ali AKYÜREK²

1. GİRİŞ

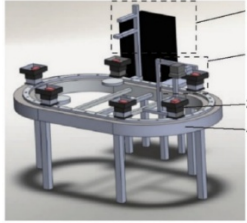
Et ve et ürünlerinde kalite ve güvenliğin sağlanması, tüketici sağlığının korunması ve gıda zincirinde sürdürülebilirliğin desteklenmesi açısından kritik bir öneme sahiptir. Geleneksel analiz yöntemleri çoğu zaman numunenin tahrip edilmesini, kimyasal kullanımını ve yüksek zaman-enerji maliyetlerini gerektirdiğinden, modern gıda endüstrisinde tahribatsız analiz yaklaşımlarına olan ilgi giderek artmaktadır. Bu bağlamda, görüntüleme ve sensör tabanlı tekniklerle birlikte yapay zekâ destekli veri analiz yöntemleri, et ve et ürünlerinde kalite sınıflandırması, tazelik değerlendirmesi ve bozulma tespiti gibi süreçlerde hızlı, güvenilir ve çevre dostu çözümler sunmaktadır. Özellikle makine öğrenmesi ve derin öğrenme tabanlı modeller, yüksek boyutlu verilerin etkin şekilde işlenmesini sağlayarak gıda analizlerinde yeni bir paradigma oluşturmaktadır (Caccialanza, Cerrato, & Galli, 2023; Haji, Kerbach, & Al-Ansari, 2022; Rebezov et al., 2024).

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Meram Meslek Yüksekokulu, Gıda İşleme Bölümü, ORCID: 0000-0002-2453-1645.

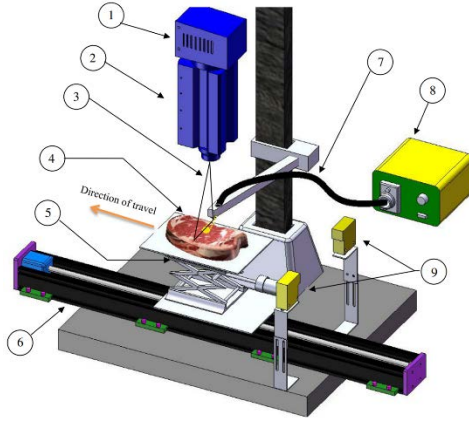
² Dr. Öğr. Üyesi, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Tıp Fakültesi, Temel Tıp Bilimleri Bölümü, Biyoistatistik ve Tıbbi Bilişim ABD, ORCID: 0000-0002-0520-9888.

2. TAHRİBATSIZ ANALİZ TEKNİKLERİNE GENEL BAKIŞ

Et ve et ürünlerinde tahribatsız analiz teknikleri, kalite ve güvenlik değerlendirmelerinin hızlı ve numuneye zarar vermeden gerçekleştirilmesine olanak sağlamaktadır. Görüntüleme tabanlı yöntemler, özellikle bilgisayarlı görü ve hiperspektral görüntüleme teknikleri aracılığıyla etin yüzey özellikleri, doku yapısı ve bileşen dağılımının analiz edilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu konuda yapılan bir tasarım Şekil 1. de sunulmuştur. Spektroskopik yaklaşımlar ise görünür, yakın kızılötesi ve orta kızılötesi bantlarda elde edilen spektral bilgiler sayesinde kimyasal ve fiziksel özelliklerin tahmin edilmesini mümkün kılmaktadır. Buna ek olarak, elektronik burun, elektronik dil ve biyosensörler gibi sensör tabanlı sistemler, yapay zekâ destekli veri analizi ile birleştirilerek gerçek zamanlı kalite izleme uygulamalarında öne çıkmaktadır. Yaygınlığı giderek artan hiperspektral kamera sistemleri de Şekil 2. de gösterilmiştir. Bu yöntemler, klasik kimyasal ve mikrobiyolojik analizlerle karşılaştırıldığında daha düşük zaman ve enerji gereksinimi, çevresel sürdürülebilirlik ve endüstriyel hatlara entegrasyon açısından önemli avantajlar sunmaktadır (Jo et al., 2025; Mo et al., 2024; Wu, Liang, Wang, Wu, & Sun, 2022; Zheng, Chen, Li, & Zhang, 2023).



Şekil 1. Algılama cihazının çalışma prensibi şemaları. Bu şekil, cihazın ana yapısını göstermektedir. Not: 1. Spektral veri toplama ünitesi; 2. Mesafe ölçme ünitesi; 3. Numune yerleştirme tablası; 4. Numune iletilim ünitesi (Li et al., 2024).



Şekil 2. Hiperspektral görüntüleme sisteminin şematik diyagramı. Bu sistem, hiperspektral görüntüleri toplamak için kullanılır. Not:
1. InGaAs kamera; 2. Spektrograf; 3. Gelen ışın demetinin merkezinden 5 mm uzaklıkta bulunan çizgi tarama kamerasının görüş alanı (FOV); 4. Numune; 5. Otomatik dikey tabla; 6. Numuneyi çizgi tarama altında hareket yönünde hareket ettiren doğrusal kızak; 7. Gelen fiber optik kablo; 8. Işık kaynağı tungsten halojen lamba; 9. Fotoelektrik anahtar (Li et al., 2024).

Tahribatsız analiz teknikleri, verimlilikleri, hızları ve çevre dostu olmaları nedeniyle et kalitesinin değerlendirilmesinde giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Bu yöntemler, üründe herhangi bir değişikliğe yol açmadan anlık analiz yapılmasına olanak tanıyan ileri teknolojilerden yararlanmakta ve et endüstrisinde kalite güvencesi ile güvenliğe önemli katkılar sağlamaktadır. Bu genel bakış, özellikle yapay zekâ temelli yaklaşımlar, spektroskopi ve görüntüleme yöntemleri başta olmak üzere en ilgili tahribatsız teknikleri sentezlemektedir.

2.1. Spektroskopik Teknikler

2.1.1. Yakın kızılötesi spektroskopisi

Yakın kızılötesi spektroskopisi (NIRS), et endüstrisinde yaygın olarak kullanılan önemli bir tahribatsız tekniktir. Bu

yöntem; yağ içeriği, nem düzeyi ve protein bileşimi gibi et kalite özelliklerinin hızlı bir şekilde değerlendirilmesini sağlar. (Prieto, Pawluczyk, Dugan, & Aalhus, 2017), NIRS'in invaziv(temaslı) olmaması ve hızlı veri toplama kapasitesi sayesinde et kalitesinin tahmininde etkinliği artırdığını ve bunun tüketicilerin kalite ve sağlık beklentileriyle uyumlu olduğunu vurgulamıştır. Şekil 3.'te gerçek zamanlı NIR kullanımı örneği gösterilmiştir.



Şekil 3. Taşınabilir bir cihaz kullanılarak sığır antrikotundan gerçek zamanlı olarak yakın kızılötesi (NIR) spektrumlarının toplanması. Kaynak: Kanada Tarım ve Gıda Bakanlığı – Lacombe (Prieto et al., 2017).

NIRS'in geniş uygulanabilirliği, et içerisindeki farklı dokuları karakterize edebilme yeteneği ile desteklenmekte olup, bu durum literatürde ayrıntılı olarak ele alınmıştır (Chapman, Elbourne, Truong, & Cozzolino, 2020).

2.1.2. Hiperspektral görüntüleme

Hiperspektral görüntüleme, NIRS'in gelişmiş olarak kabul edilmekte ve çoklu dalga boylarında spektral veri toplanmasına olanak tanıyarak etin fiziksel ve kimyasal

özellikleri hakkında daha zengin ve ayrıntılı bilgiler sunmaktadır. Yapılan çalışmalarda karkas ve et kalite değerlendirmesinde görüntüleme teknolojilerindeki gelişmeleri tartışılmış; bu teknolojilerin kalite özelliklerini tahribatsız olarak belirleme ve kalite parametrelerini tahmin etme yeteneğini vurgulamıştır (Silva, Guedes, Rodrigues, & Teixeira, 2020). Başka bir çalışmada ise, görüntüleme teknolojilerinin spektroskopi ile entegrasyonunun et kalitesi ve güvenliği hakkında bütüncül bilgiler sağlayabileceğini ayrıntılı biçimde ele almıştır (Jiang et al., 2025).

2.1.3. Raman spektroskopisi

Raman spektroskopisi, moleküler titreşimlere duyarlılığı ile bilinen ve tahribatsız et analizinde umut vadeden bir diğer araçtır. Bu teknik, et bileşenlerinin ayrıntılı karakterizasyonuna olanak tanıyarak güvenlik değerlendirmeleri ve kalite analizlerini desteklemektedir (Li et al., 2024). Raman tekniklerinin yapay zekâ ile entegrasyonunun, kalite sınıflandırmalarının doğruluğunu artırdığı gösterilmiş; bu durum spektroskopi ile modern veri analitiği arasındaki sinerjik potansiyeli ortaya koymuştur (Shi et al., 2021).

2.2. Tahribatsız Analizde Yapay Zekâ

Yapay zekâ teknolojileri, geleneksel tahribatsız analiz tekniklerinin yeteneklerini artırmak amacıyla giderek daha fazla kullanılmaktadır. Örneğin, yapay zekâ algoritmaları; NIRS ve bilgisayarlı görü gibi çeşitli tahribatsız yöntemlerden elde edilen verileri analiz ederek et kalitesini daha yüksek doğrulukla sınıflandırabilmektedir. Wang ve Li, bu yapay zekâ tekniklerinin et işleme süreçlerindeki rolünü ortaya koyarak, kalite standartlarına uyumun sağlanmasına ve gıda güvenliğinin artırılmasına katkı sunduğunu belirtmiştir (Wang & Li, 2024).

2.2.1. Bilgisayarlı görü

Bilgisayarlı görü teknikleri, yapay zekânın bir alt alanı olarak etin tazeliği ve kalitesinin tahribatsız değerlendirilmesinde önemli ilerlemeler kaydetmektedir. Shi ve ark., bu teknolojilerin doku, renk ve genel kalite gibi duysal özelliklerin değerlendirilmesindeki etkinliğini ortaya koymuştur (Shi et al., 2021). Bilgisayarlı görü yöntemleri çevrim içi (online) değerlendirme yapabilme kapasitesine sahip olduğundan, özellikle ticari et işleme ortamlarında büyük avantaj sağlamaktadır (Taheri-Garavand, Fatahi, Shahbazi, & de la Guardia, 2019). Benzer şekilde, görüntüleme verilerine dayalı olarak etle ilişkili parametrelerin makine öğrenmesi ile sınıflandırılabilirdiği teknolojik gelişmeler de rapor edilmiştir (Medeiros et al., 2020).

2.2.2. Çok modlu tekniklerin entegrasyonu

Tahribatsız analizde gelecekteki gelişmelerin, farklı tekniklerin güçlü yönlerini birleştirerek et kalitesi ve güvenliğinin daha kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesini sağlayacak entegrasyonlara odaklanması beklenmektedir. Wu ve ark., görüntüleme ve spektroskopik verilerin birlikte kullanılması gibi farklı tahribatsız teknolojilerin yakınsamasının ana akım bir yaklaşım hâline geleceğini öngörmüştür (Wu et al., 2022). Bu çok boyutlu strateji, et kalitesinin karmaşıklığını tekil yöntemlerin tek başına sağlayamayacağı biçimde yakalayabilme potansiyeline sahiptir.

3. YAPAY ZEKA VE MAKİNE ÖĞRENMESİ TEMELLİ YAKLAŞIMLAR

Et ve et ürünlerinde tahribatsız analiz uygulamalarında makine öğrenmesi algoritmaları, karmaşık veri yapılarının modellenmesi ve kalite parametrelerinin tahmin edilmesi

amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Destek vektör makineleri (Support Vector Machines, SVM), k-en yakın komşu (kNN) ve Random Forest gibi yöntemler; sınıflandırma, regresyon ve örüntü tanıma problemlerinde yüksek doğruluk sağlamaları nedeniyle tercih edilmektedir. Bu algoritmalar, özellikle hiperspektral ve multispektral verilerden elde edilen spektral özneliklerin işlenmesinde etkili sonuçlar sunmakta ve etin tazelik durumu, yağ oranı ve bozulma seviyesinin belirlenmesinde başarılı performans göstermektedir(Jo, Lee, Lee, Jeon, & Jung, 2024; Messina, Sievenpiper, Williamson, Kiel, & Erdman Jr, 2022; Mo et al., 2024).

Derin öğrenme yaklaşımları ise manuel özellik çıkarımı gereksinimini azaltarak, ham görüntü ve spektral verilerden doğrudan öğrenme yeteneği sunmaktadır. Evrişimli sinir ağıları (Convolutional Neural Networks, CNN) uzaysal özelliklerin otomatik olarak öğrenilmesini sağlarken, otoenkoder tabanlı modeller yüksek boyutlu verilerin indirgenmesi ve gürültü giderimi süreçlerinde kullanılmaktadır. Son yıllarda geliştirilen hibrit modeller, görüntüsel ve spektral bilgilerin birlikte kullanıldığı veri temsilleri aracılığıyla analiz doğruluğunu artırmakta ve et ürünlerine yönelik tahribatsız kalite değerlendirmelerinde güçlü bir alternatif oluşturmaktadır (Abd Elfattah, Ewees, Darwish, & Hassanien, 2025; Bhuiyan, Haider, Haque, Uddin, & Hasan, 2024; Hidayat, Saputri, & Aziz, 2022; Prasath & Navaneethan, 2024).

4. ET VE ET ÜRÜNLERİNDE UYGULAMA ALANLARI

Yapay zekâ tabanlı tahribatsız analiz teknikleri, et ve et ürünlerinde yağ ve kas dokusunun ayrıştırılması ve nicel olarak değerlendirilmesinde etkin biçimde kullanılmaktadır. Görüntüleme ve spektral verilerden elde edilen bilgiler, makine

öğrenmesi ve derin öğrenme modelleri aracılığıyla işlenerek yağ dağılımı, mermerleşme düzeyi ve doku homojenliği gibi kalite göstergelerinin belirlenmesine olanak sağlamaktadır. Ayrıca bu yaklaşımlar, etin tazelik durumunun izlenmesi ve bozulma sürecine bağlı fiziksel ve kimyasal değişimlerin erken aşamada tespit edilmesinde önemli avantajlar sunmaktadır. Özellikle hiperspektral görüntüleme ile entegre edilen yapay zekâ modelleri, bozulma kaynaklı spektral değişimleri yüksek doğrulukla yakalayabilmektedir (Fan & Su, 2022; Jia, van Ruth, Scollan, & Koidis, 2022; Kucha & Olaniyi, 2024; Sun, Yang, Cheng, Wang, & Fu, 2024).

Bunun yanı sıra, yapay zekâ destekli sistemler kalite sınıflandırması ve gıda sahteciliğinin belirlenmesi gibi kritik uygulama alanlarında da yaygınlaşmaktadır. Farklı hayvan türlerinin, işleme yöntemlerinin veya katkı maddelerinin ayırt edilmesi, görüntü ve spektral tabanlı veri analizi sayesinde hızlı ve güvenilir biçimde gerçekleştirilebilmektedir. Mikrobiyal yük, lipid oksidasyonu ve pH gibi kimyasal kalite göstergelerinin dolaylı olarak tahmin edilmesi ise klasik analizlere olan bağımlılığı azaltarak endüstriyel süreçlerde zaman ve maliyet tasarrufu sağlamaktadır. Bu yönüyle yapay zekâ tabanlı tahribatsız analiz yaklaşımları, et endüstrisinde akıllı kalite kontrol ve sürdürülebilir üretim hedeflerine katkı sunmaktadır (Ahamed, Saifullah, Shellie, & Stanley, 2025; Feng, Lan, Wu, & Pan, 2024; Luong et al., 2022; Sristi, Das, Akhter, Kaniya, & Hashem, 2025).

5. ENDÜSTRİYEL KATKILAR

Yapay zekâ tabanlı tahribatsız analiz teknikleri, et ve et ürünleri endüstrisinde enerji ve zaman verimliliğinin artırılmasına önemli katkılar sağlamaktadır. Geleneksel kimyasal ve mikrobiyolojik analizlerin aksine, görüntüleme ve sensör

tabanlı sistemler üretim hatları üzerinde çevrim içi (online) olarak uygulanabilmekte ve analiz sürelerini önemli ölçüde kısaltmaktadır. Bu durum hem enerji tüketiminin azaltılmasına hem de iş gücü ve operasyonel maliyetlerin düşürülmesine olanak tanımaktadır. Ayrıca tahribatsız yaklaşımlar, kimyasal reaktif kullanımını minimize ederek çevresel yükün azaltılmasına ve sürdürülebilir üretim hedeflerinin desteklenmesine katkı sunmaktadır (Kumar et al., 2023; Parlasca & Qaim, 2022; Rahman, Razimi, Ariffin, & Hashim, 2024).

Bununla birlikte, yapay zekâ destekli sistemler erken kalite ve bozulma tespiti sayesinde gıda israfının önlenmesinde kritik bir rol üstlenmektedir. Ürünlerin gerçek zamanlı olarak izlenmesi, hatalı veya standart dışı ürünlerin erken aşamada ayrıştırılmasını mümkün kılarak kaynak kayıplarını azaltmaktadır. Bu teknolojilerin akıllı üretim ve kalite kontrol sistemlerine entegrasyonu, Endüstri 4.0 ve dijital gıda işleme yaklaşımları kapsamında veri odaklı karar mekanizmalarının geliştirilmesini sağlamaktadır. Dolayısıyla yapay zekâ tabanlı tahribatsız analiz teknikleri, et endüstrisinde hem sürdürülebilirlik hem de rekabet gücü açısından stratejik bir teknoloji olarak öne çıkmaktadır (Alvarez-García, Mendoza, Muñoz-Vílchez, Nuñez-Melgar, & Quilcate, 2024; Echegaray et al., 2022; Hamill et al., 2024; Patel, Samad, Hamza, Muazzam, & Harahap, 2022).

6. SONUÇ

Yapay zekâ tabanlı tahribatsız analiz teknikleri, et ve et ürünlerinde kalite, güvenlik ve sürdürülebilirliğin birlikte ele alınmasına olanak sağlayan güçlü bir yaklaşım sunmaktadır. Görüntüleme, spektroskopi ve sensör tabanlı sistemlerden elde edilen yüksek boyutlu verilerin yapay zekâ algoritmaları ile analiz edilmesi, hızlı ve güvenilir kalite değerlendirmelerini

mümkün kılmaktadır. Bu yöntemler, geleneksel analizlere kıyasla daha düşük enerji ve zaman gereksinimiyle çalışarak endüstriyel süreçlerde verimliliği artırmakta ve modern gıda üretim sistemlerinde önemli bir potansiyel taşımaktadır (Borges, da Costa, Trombete, & Câmara, 2022; Levi, Yen, Baruch, & Machluf, 2022; Takahashi, Yoshida, Gao, Yamanaka, & Shimizu, 2022).

Bununla birlikte, bu teknolojilerin endüstriyel uygulamalara yaygın şekilde entegre edilmesinde veri standardizasyonu, model genellenebilirliği, yüksek donanım maliyetleri ve gerçek zamanlı sistem gereksinimleri gibi çeşitli zorluklar bulunmaktadır. Gelecekteki araştırmaların, daha hafif ve açıklanabilir yapay zekâ modellerinin geliştirilmesine, çoklu veri kaynaklarının bütünleşik kullanımına ve gerçek zamanlı karar destek sistemlerine odaklanması beklenmektedir. Ayrıca sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda enerji verimli algoritmaların ve akıllı üretim hatlarına uyumlu çözümlerin geliştirilmesi, yapay zekâ tabanlı tahribatsız analiz tekniklerinin et endüstrisindeki etkisini daha da artıracaktır (Chodkowska, Wódz, & Wojciechowski, 2022; Kumar et al., 2023; Mateti, Laha, & Shenoy, 2022; Schirone et al., 2022).

KAYNAKÇA

- Abd Elfattah, M., Ewees, A. A., Darwish, A., & Hassanien, A. E. (2025). Detection and classification of meat freshness using an optimized deep learning method. *Food Chemistry*, 144783.
- Ahamed, Z., Saifullah, M., Shellie, R. A., & Stanley, R. A. (2025). Volatilomics in meat research: Species authentication, quality assessment & adulteration detection. *Food Research International*, 214, 116690.
- Alvarez-García, W. Y., Mendoza, L., Muñoz-Vílchez, Y., Nuñez-Melgar, D. C., & Quilcate, C. (2024). Implementing artificial intelligence to measure meat quality parameters in local market traceability processes. *International Journal of Food Science and Technology*, 59(11), 8058-8068.
- Bhuiyan, Z. W., Haider, S. A. R., Haque, A., Uddin, M. R., & Hasan, M. (2024). IoT Based Meat Freshness Classification Using Deep Learning. *IEEE Access*.
- Borges, M. M., da Costa, D. V., Trombete, F. M., & Câmara, A. K. F. I. (2022). Edible insects as a sustainable alternative to food products: An insight into quality aspects of reformulated bakery and meat products. *Current Opinion in Food Science*, 46, 100864.
- Caccialanza, A., Cerrato, D., & Galli, D. (2023). Sustainability practices and challenges in the meat supply chain: a systematic literature review. *British Food Journal*, 125(12), 4470-4497.
- Chapman, J., Elbourne, A., Truong, V. K., & Cozzolino, D. (2020). Shining light into meat—a review on the recent advances in in vivo and carcass applications of near

- infrared spectroscopy. *International Journal of Food Science and Technology*, 55(3), 935-941.
- Chodkowska, K. A., Wódz, K., & Wojciechowski, J. (2022). Sustainable future protein foods: the challenges and the future of cultivated meat. *Foods*, 11(24), 4008.
- Echegaray, N., Hassoun, A., Jagtap, S., Tetteh-Caesar, M., Kumar, M., Tomasevic, I., . . . Lorenzo, J. M. (2022). Meat 4.0: principles and applications of industry 4.0 technologies in the meat industry. *Applied Sciences*, 12(14), 6986.
- Fan, K.-J., & Su, W.-H. (2022). Applications of fluorescence spectroscopy, RGB-and multispectral imaging for quality determinations of white meat: A review. *Biosensors*, 12(2), 76.
- Feng, J., Lan, H., Wu, Z., & Pan, D. (2024). Novel integration of lateral flow strip and point-of-care isothermal amplification techniques for meat adulteration detection: A comprehensive review. *Trends in Food Science & Technology*, 152, 104698.
- Haji, M., Kerbache, L., & Al-Ansari, T. (2022). Food quality, drug safety, and increasing public health measures in supply chain management. *Processes*, 10(9), 1715.
- Hamill, R. M., Ferragina, A., Mishra, J. P., Kavanagh, A., Hibbett, M., Gagaoua, M., . . . Rady, A. (2024). Toward meat Industry 4.0: opportunities and challenges for digitalized red meat processing. *Food Industry 4.0*, 259-281.
- Hidayat, T., Saputri, D. U. E., & Aziz, F. (2022). Meat image classification using deep learning with Resnet152V2 architecture. *Jurnal Techno Nusa Mandiri*, 19(2), 131-140.

- Jia, W., van Ruth, S., Scollan, N., & Koidis, A. (2022). Hyperspectral Imaging (HSI) for meat quality evaluation across the supply chain: Current and future trends. *Current Research in Food Science*, 5, 1017-1027.
- Jiang, Y., Wang, D., Wang, Z., Dai, H., Wang, C., & Wang, Y. (2025). Recent Advances in Spectroscopy and Imaging Techniques for Nondestructive Detection of Meat Quality and Safety. *Food Science & Nutrition*, 13(12), e71303.
- Jo, K., Lee, S., Jeon, H., Kim, S., Han, S., Woo, M., . . . Jung, S. (2025). Changes in the properties of frozen meat with freezing and storage conditions and non-destructive analyses for monitoring meat quality. *Food science of animal resources*, 45(3), 711.
- Jo, K., Lee, S., Lee, D.-H., Jeon, H., & Jung, S. (2024). Hyperspectral imaging–based assessment of fresh meat quality: Progress and applications. *Microchemical Journal*, 197, 109785.
- Kucha, C., & Olaniyi, E. O. (2024). Applications of hyperspectral imaging in meat tenderness detection: Current research and potential for digital twin technology. *Food Bioscience*, 58, 103754.
- Kumar, P., Abubakar, A. A., Verma, A. K., Umaraw, P., Adewale Ahmed, M., Mehta, N., . . . Sazili, A. Q. (2023). New insights in improving sustainability in meat production: opportunities and challenges. *Critical reviews in food science and nutrition*, 63(33), 11830-11858.
- Levi, S., Yen, F.-C., Baruch, L., & Machluf, M. (2022). Scaffolding technologies for the engineering of cultured meat: Towards a safe, sustainable, and scalable production. *Trends in Food Science & Technology*, 126, 13-25.

- Li, Y., Wang, H., Yang, Z., Wang, X., Wang, W., & Hui, T. (2024). Rapid non-destructive detection technology in the field of meat tenderness: A review. *Foods*, 13(10), 1512.
- Luong, N.-D. M., Coroller, L., Zagorec, M., Moriceau, N., Anthoine, V., Guillou, S., & Membré, J.-M. (2022). A Bayesian approach to describe and simulate the pH evolution of fresh meat products depending on the preservation conditions. *Foods*, 11(8), 1114.
- Mateti, T., Laha, A., & Shenoy, P. (2022). Artificial meat industry: Production methodology, challenges, and future. *Jom*, 74(9), 3428-3444.
- Medeiros, A. D. d., Silva, L. J. d., Ribeiro, J. P. O., Ferreira, K. C., Rosas, J. T. F., Santos, A. A., & Silva, C. B. d. (2020). Machine learning for seed quality classification: An advanced approach using merger data from FT-NIR spectroscopy and X-ray imaging. *Sensors*, 20(15), 4319.
- Messina, M., Sievenpiper, J. L., Williamson, P., Kiel, J., & Erdman Jr, J. W. (2022). Perspective: soy-based meat and dairy alternatives, despite classification as ultra-processed foods, deliver high-quality nutrition on par with unprocessed or minimally processed animal-based counterparts. *Advances in nutrition*, 13(3), 726-738.
- Mo, K., Tang, Y., Zhu, Y., Li, X., Li, J., Peng, X., . . . Zou, P. (2024). Fresh meat classification using laser-induced breakdown spectroscopy assisted by LightGBM and Optuna. *Foods*, 13(13), 2028.
- Parlasca, M. C., & Qaim, M. (2022). Meat consumption and sustainability. *Annual Review of Resource Economics*, 14, 17-41.
- Patel, H., Samad, A., Hamza, M., Muazzam, A., & Harahap, M. K. (2022). Role of artificial intelligence in livestock and

poultry farming. *Sinkron: jurnal dan penelitian teknik informatika*, 6(4), 2425-2429.

Prasath, S. T., & Navaneethan, C. (2024). Deep learning framework for colorectal cancer classification using ResNet18 based on dietary habits related to meat intake and cooking methods. *IEEE Access*.

Prieto, N., Pawluczyk, O., Dugan, M. E. R., & Aalhus, J. L. (2017). A review of the principles and applications of near-infrared spectroscopy to characterize meat, fat, and meat products. *Applied spectroscopy*, 71(7), 1403-1426.

Rahman, M. M., Razimi, M. S. A., Ariffin, A. S., & Hashim, N. (2024). Navigating moral landscape: Islamic ethical choices and sustainability in Halal meat production and consumption. *Discover Sustainability*, 5(1), 225.

Rebezov, M., Khayrullin, M., Assenova, B., Farida, S., Baydan, D., Garipova, L., . . . Rodionova, S. (2024). Improving meat quality and safety: innovative strategies. *Slovak Journal of Food Sciences*, 18.

Schirone, M., Esposito, L., D'Onofrio, F., Visciano, P., Martuscelli, M., Mastrocola, D., & Paparella, A. (2022). Biogenic amines in meat and meat products: A review of the science and future perspectives. *Foods*, 11(6), 788.

Shi, Y., Wang, X., Borhan, M. S., Young, J., Newman, D., Berg, E., & Sun, X. (2021). A review on meat quality evaluation methods based on non-destructive computer vision and artificial intelligence technologies. *Food science of animal resources*, 41(4), 563.

Silva, S., Guedes, C., Rodrigues, S., & Teixeira, A. (2020). Non-destructive imaging and spectroscopic techniques for assessment of carcass and meat quality in sheep and goats: A review. *Foods*, 9(8), 1074.

- Sristi, P., Das, N., Akhter, A., Kaniya, N., & Hashem, M. (2025). Relation among meat pH, color and tenderness-A review. *Meat Research*, 5(03).
- Sun, J., Yang, F., Cheng, J., Wang, S., & Fu, L. (2024). Nondestructive identification of soybean protein in minced chicken meat based on hyperspectral imaging and VGG16-SVM. *Journal of Food Composition and Analysis*, 125, 105713.
- Taheri-Garavand, A., Fatahi, S., Shahbazi, F., & de la Guardia, M. (2019). A nondestructive intelligent approach to real-time evaluation of chicken meat freshness based on computer vision technique. *Journal of Food Process Engineering*, 42(4), e13039.
- Takahashi, H., Yoshida, A., Gao, B., Yamanaka, K., & Shimizu, T. (2022). Harvest of quality-controlled bovine myogenic cells and biomimetic bovine muscle tissue engineering for sustainable meat production. *Biomaterials*, 287, 121649.
- Wang, M., & Li, X. (2024). Application of artificial intelligence techniques in meat processing: A review. *Journal of Food Process Engineering*, 47(3), e14590.
- Wu, X., Liang, X., Wang, Y., Wu, B., & Sun, J. (2022). Non-destructive techniques for the analysis and evaluation of meat quality and safety: A review. *Foods*, 11(22), 3713.
- Zheng, X., Chen, L., Li, X., & Zhang, D. (2023). Non-destructive detection of meat quality based on multiple spectral dimension reduction methods by near-infrared spectroscopy. *Foods*, 12(2), 300.

TÜRKİYE VE DÜNYADA
MÜHENDİSLİK

yaz
yayınları

YAZ Yayınları
M.İhtisas OSB Mah. 4A Cad. No:3/3
İscehisar / AFYONKARAHİSAR
Tel : (0 531) 880 92 99
yazyayinlari@gmail.com • www.yazyayinlari.com