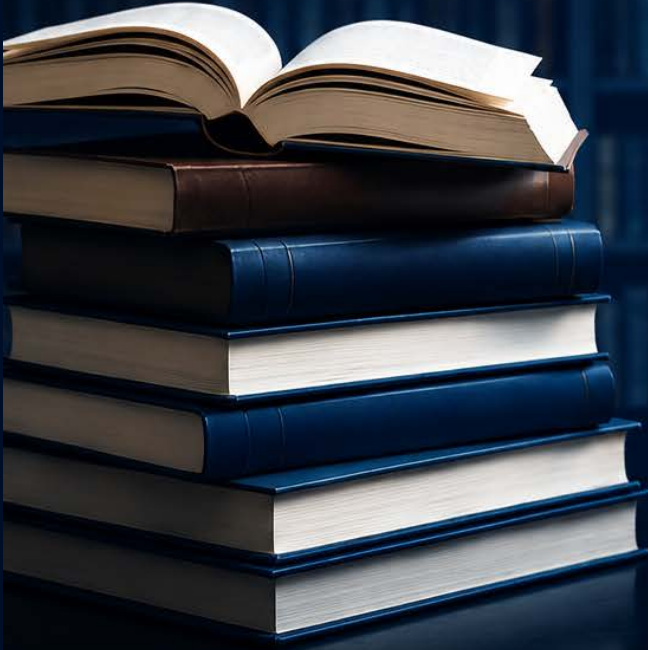


GIDA BİLİMLERİ VE MÜHENDİSLİĞİ ALANINDA GÜNCEL KONULAR VE AKADEMİK DEĞERLENDİRMELER

Editör: Doç.Dr. Hatice PEKMEZ



yaz
yayınları

**Gıda Bilimleri ve Mühendisliği Alanında
Güncel Konular ve Akademik Değerlendirmeler**

Editör

Doç.Dr. Hatice PEKMEZ

yaz
yayınları

2026

**Gıda Bilimleri ve Mühendisliği Alanında
Güncel Konular ve Akademik
Değerlendirmeler**

Editör: Doç.Dr. Hatice PEKMEZ

© 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, yayımlanamaz, depolanamaz.

E_ISBN 978-625-8926-88-0

Ekim 2026 – 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

Gıda Endüstrisinde Yeni Teknolojiler: Dijital Dönüşümün Etkisi.....	1
<i>Nazan ÇAĞLAR</i>	
Süt Endüstrisi Yan Ürünlerinin Fonksiyonel Gıda Bileşenlerine Dönüştürülmesi: Upcycling Yaklaşımları.....	14
<i>Aslı ERDEM, Özge Duygu OKUR</i>	
Edible Biodegradable Films and Coatings, Active Food Packaging Systems, Their Current Applications and Future Outlook.....	47
<i>Burcu GÖKKAYA ERDEM</i>	
Kırmızı Pancar Turşu Sularının Fiziko-Kimyasal Özellikleri ve Lactobacillus Spp. Popülasyonunun Probiyotik Potansiyel Açısından Değerlendirilmesi.....	73
<i>Tülay DURAN, Hüseyin DURAN</i>	
Yeni Nesil Gıda Ambalajları Kavramsal Çerçeve ve Sınıflandırma	88
<i>Evren ÇAĞLARER</i>	
Gıda Ambalajlamada Biyobozunur Malzemeler: Temel İlkeler, Polimer Türleri.....	103
<i>Evren ÇAĞLARER</i>	
Gıda Kayıp ve Atıklarının Azaltılmasında Dijital Teknolojiler	123
<i>Aysel İÇÖZ</i>	

Akıllı Zeytinyağı İşleme Teknolojileri (Gıda 4.0): Kontinü Malaksasyon Dinamiklerinin Yapay Sinir Ağları ile Modellenmesi, Kemometrik Kalite İzleme ve Hızlı Spektroskopik Tağşış Tespiti	152
<i>Fulya HARP ÇELİK</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."

GIDA ENDÜSTRİSİNDE YENİ TEKNOLOJİLER: DİJİTAL DÖNÜŞÜMÜN ETKİSİ

Nazan ÇAĞLAR¹

1. GİRİŞ

Medeniyetin gelişmesine rağmen dünyanın bazı bölgelerinde gıda kıtlığının devam etmesi, gıda teknolojilerinde dijital dönüşümün önemini artırmaktadır (FAO, 2023; World Economic Forum [WEF], 2022). Gıda endüstrisindeki dijitalleşme, son otuz yılda teknolojik yeniliklerin etkisiyle hız kazanmış; mobil uygulamalar, otomasyon sistemleri, robotik teknolojiler ve büyük veri analitiği sayesinde üretim süreçlerinde verimlilik artışı ve maliyetlerde azalma sağlanmıştır (Javaid ve ark., 2022; Verdouw ve ark., 2021). Bu teknolojiler, üretim planlamasının iyileştirilmesi, kaynak kullanımının optimize edilmesi ve gıda arz güvenliğinin güçlendirilmesine önemli katkılar sunmaktadır (FAO, 2023).

Bununla birlikte, COVID-19 pandemisi ve küresel ekonomik belirsizlikler, gıda tedarik zincirlerinde önemli aksamalara neden olmuş, üretim ve lojistik süreçlerini olumsuz etkilemiştir (OECD, 2020). Artan dünya nüfusu, iklim değişikliği ve doğal kaynakların sınırlı olması nedeniyle önümüzdeki yıllarda gıda talebinin daha da artacağı öngörülmektedir (FAO, 2023). Bu nedenle yapay zekâ, Nesnelerin İnterneti (IoT), büyük veri ve otomasyon teknolojileri gibi dijital uygulamaların gıda sektöründe yaygınlaştırılması sürdürülebilir üretim açısından

¹ Dr., Gaziantep Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, Gaziantep, Türkiye, ORCID: 0000-0001-8056-7565.

kritik önem taşımaktadır (Wolfert ve ark., 2017; Javaid ve ark., 2022). Bu çalışma, gıda endüstrisinde dijital dönüşümün uygulanma alanlarını, sektöre sağladığı katkıları ve gelecekteki potansiyelini değerlendirmeyi amaçlamaktadır.

2. TEKNOLOJİNİN GIDA ENDÜSTRİSİNE ETKİSİ

Gıda endüstrisinde dijitalleşme, üretimden tüketime kadar tüm değer zincirini yeniden şekillendiren önemli bir dönüşüm sürecidir. Nesnelerin İnterneti (IoT), bulut bilişim, büyük veri analitiği ve gerçek zamanlı izleme sistemleri, gıda üretiminde verimliliği artırırken süreçlerin daha etkin yönetilmesine olanak sağlamaktadır (Wolfert ve ark., 2017; Javaid ve ark., 2022). Bu teknolojiler sayesinde üretim süreçleri sürekli izlenebilmekte, olası hatalar erken aşamada tespit edilmekte ve kaynak kullanımı optimize edilmektedir (Verdouw ve ark., 2021).

Dijital dönüşüm yalnızca üretim süreçlerini değil, aynı zamanda gıda hizmetleri, tedarik zinciri yönetimi ve perakende sektörünü de etkilemektedir. Geleneksel iş modelleri yerini veri odaklı, esnek ve müşteri ihtiyaçlarına hızlı yanıt verebilen sistemlere bırakmaktadır (WEF, 2022). Bu dönüşüm, işletmelerin rekabet avantajı elde etmelerine katkı sağlarken sürdürülebilir üretim uygulamalarının yaygınlaşmasını da desteklemektedir (FAO, 2023).

2.1. Gıda Teknolojisi Endüstrisinin İtici Gücü

Modern yaşamın hızlanması, kentleşme ve tüketici alışkanlıklarının değişmesi gıda teknolojilerinin gelişimini hızlandıran temel faktörler arasında yer almaktadır (Deloitte, 2023). Tüketicilerin hızlı, güvenilir ve kaliteli gıdaya erişim beklentileri; çevrim içi sipariş sistemleri, dijital envanter

yönetimi, restoran otomasyonları ve akıllı teslimat çözümlerinin yaygınlaşmasını sağlamıştır (Javaid ve ark., 2022).

Gıda teknolojilerinin gelişimini yönlendiren temel unsurlar aşağıda özetlenmektedir:

Daha sağlıklı ve besleyici ürünlere yönelik talep:

Günümüzde tüketiciler yalnızca lezzet değil, aynı zamanda besin değeri yüksek, doğal içerikli ve fonksiyonel özelliklere sahip ürünleri tercih etmektedir. Bu durum, fonksiyonel gıdalar, alternatif protein kaynakları ve kişiselleştirilmiş beslenme uygulamalarına olan ilgiyi artırmaktadır (Granato ve ark., 2020; FAO, 2023).

Üretimde verimlilik gereksinimi:

Artan küresel gıda talebi nedeniyle üreticiler maliyetleri azaltırken kaliteyi koruyacak otomasyon sistemlerine yatırım yapmaktadır. Yapay zekâ, robotik sistemler ve akıllı sensörler üretim süreçlerinin daha verimli yürütülmesini sağlamaktadır (Javaid ve ark., 2022; Verdouw ve ark., 2021).

Çevresel sürdürülebilirlik ve yasal düzenlemeler:

İklim değişikliği, enerji tüketimi, karbon emisyonları ve gıda israfı gibi çevresel sorunlar sürdürülebilir üretim teknolojilerinin önemini artırmıştır. Aynı zamanda gıda güvenliği ve izlenebilirlik konusunda yürürlüğe giren düzenlemeler dijital teknolojilerin kullanımını teşvik etmektedir (FAO, 2023; OECD, 2020).

Doğruluk ve kalite yönetimi:

Dijital teknolojiler sayesinde üretim süreçlerinde insan kaynaklı hatalar azaltılmakta, kalite kontrol süreçleri standartlaştırılmakta ve ürün izlenebilirliği güçlendirilmektedir. Böylece hem üretici hem de tüketici açısından güvenilir gıda sistemleri oluşturulabilmektedir (Wolfert ve ark., 2017).

3. GIDA SEKTÖRÜNDE DİJİTAL DÖNÜŞÜM

Son yıllarda dijital dönüşüm, gıda sektöründe üretimden dağıtıma kadar tüm süreçleri etkileyen stratejik bir unsur hâline gelmiştir. Yapay zekâ (Artificial Intelligence, AI), Nesnelerin İnterneti (Internet of Things, IoT), makineden makineye iletişim (Machine-to-Machine, M2M), büyük veri analitiği ve bulut bilişim uygulamaları gıda sektöründe verimliliği artıran temel teknolojiler arasında yer almaktadır (Javaid ve ark., 2022; Verdouw ve ark., 2021).

Dijital teknolojiler sayesinde üretim süreçlerinden elde edilen veriler gerçek zamanlı olarak analiz edilmekte, üretim planlaması daha doğru yapılabilmekte ve kaynak kullanımı optimize edilmektedir (Wolfert ve ark., 2017). Aynı zamanda bu teknolojiler, gıda işletmelerinin tüketici davranışlarını analiz etmelerine, talep tahminlerini iyileştirmelerine ve pazardaki değişimlere daha hızlı uyum sağlamalarına olanak tanımaktadır (Kamble ve ark., 2020).

Mobil uygulamalar, çevrim içi sipariş sistemleri ve dijital ödeme altyapıları tüketici deneyimini geliştirirken restoranlar, perakendeciler ve gıda üreticileri arasında daha güçlü bir dijital ekosistem oluşmasını sağlamaktadır (Deloitte, 2023). Bunun yanında blockchain teknolojisi, ürünlerin üretimden tüketime kadar izlenebilirliğini artırarak gıda güvenliği ve tüketici güveninin güçlenmesine katkıda bulunmaktadır (Casino ve ark., 2019).

Dijital dönüşüm yalnızca operasyonel verimliliği artırmakla kalmayıp aynı zamanda işletmelerin sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmasına da katkı sağlamaktadır. Enerji tüketiminin azaltılması, atık yönetiminin iyileştirilmesi ve kaynak kullanımının optimize edilmesi bu dönüşümün önemli kazanımları arasında gösterilmektedir (FAO, 2023).

4. GIDA ENDÜSTRİSİNDE TEKNOLOJİNİN İNOVASYONU

Teknolojik inovasyon, gıda endüstrisinin rekabet gücünü artıran en önemli faktörlerden biridir. Endüstri 4.0 uygulamaları, otomasyon sistemleri, robotik teknolojiler ve veri analitiği sayesinde üretim süreçleri daha güvenilir, hızlı ve verimli hâle gelmektedir (Javaid ve ark., 2022).

Gıda işletmeleri, değişen tüketici beklentilerine uyum sağlayabilmek amacıyla yapay zekâ destekli kalite kontrol sistemleri, akıllı üretim hatları ve dijital tedarik zinciri yönetimi uygulamalarını giderek daha fazla benimsemektedir (Kamble ve ark., 2020). Bu teknolojiler ürün kalitesinin standardizasyonunu sağlarken üretim maliyetlerini de azaltmaktadır.

Teknolojik inovasyon aynı zamanda yeni ürün geliştirme çalışmalarını hızlandırmaktadır. Fonksiyonel gıdalar, bitki bazlı alternatif proteinler, kişiselleştirilmiş beslenme çözümleri ve sürdürülebilir ambalaj teknolojileri günümüzde gıda sektöründe öne çıkan yenilik alanlarıdır (Granato ve ark., 2020; Bogue ve ark., 2022).

Yazılım teknolojilerindeki gelişmeler de restoran yönetim sistemleri, çevrim içi sipariş platformları ve müşteri ilişkileri yönetiminde önemli avantajlar sağlamaktadır. Böylece işletmeler hem operasyonel performanslarını artırmakta hem de müşteri memnuniyetini geliştirmektedir (Deloitte, 2023).

4.1. Gıda Endüstrisinde Teknolojinin Faydaları

Araştırmalar, dijital teknolojilerin gıda sektöründe verimlilik, kalite ve sürdürülebilirlik açısından önemli katkılar sağladığını göstermektedir (Javaid ve ark., 2022). Başlıca faydalar şunlardır:

- Yapay zekâ ve büyük veri analitiği sayesinde arz-talep tahmini yapılarak gıda israfı azaltılmaktadır (FAO, 2023).

- IoT tabanlı sensörler üretim ekipmanlarını sürekli izleyerek arızaların erken tespit edilmesini sağlamaktadır (Wolfert ve ark., 2017).
- Veri analitiği tüketici tercihlerini belirleyerek müşteri deneyiminin geliştirilmesine katkı sunmaktadır (Kamble ve ark., 2020).
- Dijital sistemler işletmelere kriz yönetimi ve tedarik zinciri esnekliği kazandırmaktadır (OECD, 2020).
- Blockchain ve akıllı izleme sistemleri gıda güvenliği ile ürün izlenebilirliğini artırmaktadır (Casino ve ark., 2019).

5. GIDA HİZMETLERİNDE TEKNOLOJİ

Gıda hizmetleri sektöründe dijital teknolojilerin kullanımının yaygınlaşması, işletmelerin operasyonel verimliliğini artırırken müşteri beklentilerine daha hızlı yanıt verilmesini sağlamaktadır (Javaid ve ark., 2022). Özellikle bulut mutfaklar (ghost kitchens) ve sanal restoran modelleri, fiziksel restoran yatırımlarını azaltarak teslimat odaklı yeni iş modellerinin gelişmesine katkı sağlamıştır (Deloitte, 2023).

Çevrimiçi sipariş platformları, mobil uygulamalar ve dijital ödeme sistemleri, restoranların müşteri erişimini genişletirken hizmet süreçlerini de hızlandırmaktadır (Statista, 2023). Bununla birlikte teslimat platformlarının restoranlardan aldığı komisyon oranları işletmeler açısından önemli bir maliyet unsuru oluşturmaktadır. Bu nedenle birçok işletme kendi dijital sipariş altyapısını geliştirerek operasyonel maliyetlerini azaltmayı hedeflemektedir (OECD, 2020).

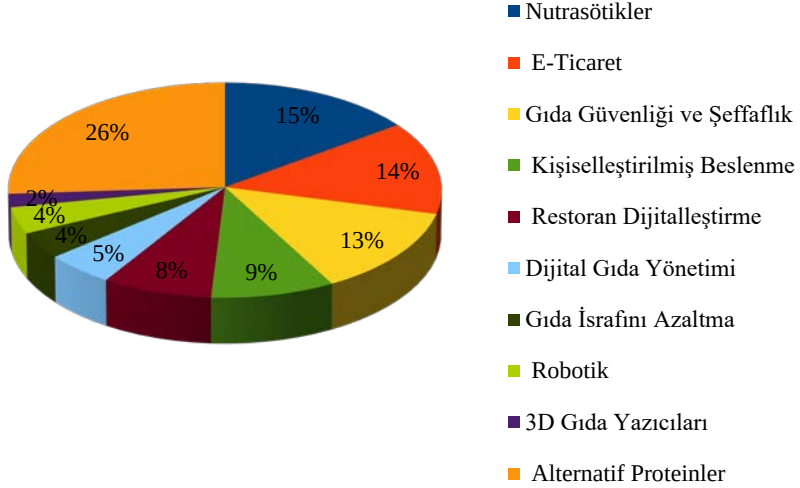
Bulut mutfak modeli; kira, servis alanı ve personel giderlerini azaltarak yalnızca üretim ve dağıtıma odaklanan daha esnek bir işletme yapısı sunmaktadır. Bu model özellikle COVID-

19 sonrası dönemde hızlı bir büyüme göstermiştir (Deloitte, 2023).

6. GIDA TEKNOLOJİSİ TRENDLERİ

Gıda endüstrisinde dijital dönüşüm yalnızca üretim süreçlerini değil, tüketici beklentilerini de değiştirmektedir. Büyük veri analitiği ve yapay zekâ destekli analizler, küresel girişimlerin önemli ölçüde alternatif proteinler, kişiselleştirilmiş beslenme, dijital gıda yönetimi ve sürdürülebilir üretim teknolojilerine yöneldiğini göstermektedir. Aşağıdaki Şekil 1 'de, 2022'de şirketleri etkileyecek en önemli 10 Gıda yeni Teknolojisi trendlerini göstermektedir (StartUs Insights, 2022).

Şekil 1. Gıda yeni teknoloji trendleri



Kaynak: StartUs Insights (2022).

6.1. Alternatif Proteinler

Alternatif protein kaynakları, çevresel sürdürülebilirlik, hayvan refahı ve artan dünya nüfusunun protein ihtiyacını karşılayabilmek amacıyla geliştirilen en önemli yenilik alanlarından biridir (FAO, 2023). Bitki bazlı proteinler, mikoproteinler, kültür eti, yenilebilir böcekler ve hassas fermantasyon teknolojileri bu alandaki başlıca uygulamalardır (Bryant ve Barnett, 2020).

Alternatif proteinlerin geleneksel hayvansal üretime göre daha düşük karbon ayak izi oluşturduğu, su tüketimini azalttığı ve sürdürülebilir gıda sistemlerine katkı sağladığı bildirilmektedir (Poore ve Nemecek, 2018).

6.2. Nutrasötikler

Nutrasötikler; fonksiyonel gıdalar, besin destekleri, prebiyotikler, probiyotikler ve postbiyotikleri kapsayan, sağlık üzerine olumlu etkileri bilimsel olarak araştırılan ürünlerdir (Granato ve ark., 2020).

COVID-19 pandemisi sonrasında bağışıklık sistemini destekleyen ürünlere yönelik tüketici ilgisi önemli ölçüde artmış, buna bağlı olarak nutrasötik pazarında hızlı bir büyüme yaşanmıştır (Galanakis, 2021). Nutrasötiklerin kardiyovasküler hastalıklar, diyabet ve oksidatif stresle ilişkili hastalıkların önlenmesine katkı sağlayabileceği bildirilmektedir (Granato ve ark., 2020).

6.3. E-Ticaret

Pandemiyle birlikte çevrim içi gıda alışverişi ve doğrudan tüketiciye satış (Direct-to-Consumer, D2C) modelleri önemli ölçüde yaygınlaşmıştır (OECD, 2020).

Dijital satış platformları üreticilere daha geniş tüketici kitlesine ulaşma, tüketicilere ise ürün çeşitliliği ve zaman

tasarrufu sağlamaktadır. Aynı zamanda çok kanallı pazarlama stratejileri müşteri deneyimini güçlendirmektedir (Statista, 2023).

6.4. Gıda Güvenliği ve Şeffaflık

Tüketicilerin ürün içeriği ve üretim süreçleri hakkında daha fazla bilgi talep etmesi nedeniyle izlenebilirlik sistemleri önem kazanmıştır (FAO, 2023).

Blockchain teknolojisi ve IoT tabanlı sensörler sayesinde üretimden tüketime kadar tüm süreç kayıt altına alınabilmekte, ürün güvenliği artırılmakta ve olası riskler daha hızlı tespit edilebilmektedir (Casino ve ark., 2019).

6.5. Kişiselleştirilmiş Beslenme

Kişiselleştirilmiş beslenme; bireyin genetik yapısı, metabolik özellikleri, yaşam tarzı ve sağlık durumuna göre beslenme önerileri geliştirilmesini ifade etmektedir (Ordovas ve ark., 2018).

Nutrigenomik uygulamaları, yapay zekâ destekli mobil sağlık sistemleri ve dijital biyobelirteç analizleri sayesinde bireye özel beslenme programlarının hazırlanması mümkün hâle gelmiştir (Ordovas ve ark., 2018).

6.6. Restoran Dijitalleştirme

Restoranlarda dijital menüler, QR kod uygulamaları, temassız ödeme sistemleri, self-servis kiosklar ve yapay zekâ destekli sipariş sistemleri müşteri deneyimini önemli ölçüde geliştirmektedir (Deloitte, 2023).

Toplanan müşteri verileri sayesinde işletmeler talep tahmini yapabilmekte, stok yönetimini iyileştirebilmekte ve kişiselleştirilmiş pazarlama stratejileri geliştirebilmektedir (Javaid ve ark., 2022).

6.7. Dijital Gıda Yönetimi

Gerçek zamanlı veri analizi, yapay zekâ ve büyük veri uygulamaları üretim planlaması, stok kontrolü ve tedarik zinciri optimizasyonunda yaygın olarak kullanılmaktadır (Wolfert ve ark., 2017).

Bu sistemler sayesinde gıda kayıpları azaltılmakta, üretim süreçleri daha verimli hâle gelmekte ve işletmeler olası tedarik sorunlarını önceden tahmin edebilmektedir (Verdouw ve ark., 2021).

6.8. Gıda İsrafını Azaltma

Küresel ölçekte üretilen gıdanın yaklaşık üçte biri kaybolmakta veya israf edilmektedir (FAO, 2023).

Yapay zekâ destekli stok yönetimi, akıllı envanter sistemleri ve veri analitiği sayesinde üretim planlaması daha doğru yapılabilmekte ve gıda atıkları önemli ölçüde azaltılabilmektedir (FAO, 2023).

6.9. Robotik

Robot teknolojileri gıda üretiminde kalite kontrol, paketleme, sınıflandırma ve depolama süreçlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Javaid ve ark., 2022).

Robotik sistemler üretimde standart kaliteyi artırırken iş gücü maliyetlerini düşürmekte ve çalışan güvenliğine katkı sağlamaktadır (International Federation of Robotics [IFR], 2023).

6.10. 3D Gıda Yazıcıları

3D gıda yazıcıları; kişiselleştirilmiş beslenme, alternatif protein üretimi ve fonksiyonel gıdaların geliştirilmesinde gelecek vadeden teknolojiler arasında yer almaktadır (Le Tan, 2025).

Bu teknoloji, ürünlerin standart kaliteyle üretilebilmesini sağlarken gıda israfının azaltılmasına ve özel gereksinimlere

uygun ürün geliştirilmesine katkı sunmaktadır (Sun ve ark., 2018).

7. SONUÇ

Gıda endüstrisi, dijital teknolojilerin hızla gelişmesiyle birlikte önemli bir dönüşüm süreci yaşamaktadır. Yapay zekâ, Nesnelerin İnterneti (IoT), büyük veri analitiği, blockchain, robotik sistemler ve otomasyon teknolojileri üretimden tüketime kadar tüm gıda zincirinde verimlilik, kalite ve sürdürülebilirlik açısından önemli avantajlar sağlamaktadır (Javaid ve ark., 2022; Wolfert ve ark., 2017).

Artan dünya nüfusu, iklim değişikliği, doğal kaynakların sınırlı olması ve gıda güvenliği konusundaki endişeler, dijital teknolojilerin kullanımını zorunlu hâle getirmektedir (FAO, 2023). Dijital dönüşüm sayesinde üretim süreçleri optimize edilmekte, gıda israfı azaltılmakta, izlenebilirlik güçlendirilmekte ve tüketicilerin güvenli gıdaya erişimi kolaylaşmaktadır (Verdouw ve ark., 2021).

Önümüzdeki yıllarda alternatif proteinler, kişiselleştirilmiş beslenme, akıllı tarım uygulamaları, robotik sistemler ve 3D gıda yazıcılarının gıda sektörünün gelişiminde belirleyici teknolojiler arasında yer alacağı öngörülmektedir (StartUs Insights, 2022).

Sürdürülebilir ve dirençli gıda sistemlerinin oluşturulabilmesi için kamu kurumları, üniversiteler ve özel sektör arasında iş birliğinin artırılması; Ar-Ge yatırımlarının desteklenmesi ve dijital teknolojilerin küçük ve orta ölçekli işletmeler tarafından da benimsenmesini sağlayacak politikaların geliştirilmesi önerilmektedir (FAO, 2023).

KAYNAKÇA

- Bogue, J., Collins, O., ve Troy, A. J. (2022). Market analysis and consumer insights for future food technologies. *Trends in Food Science ve Technology*, 124, 173–184.
- Bryant, C., ve Barnett, J. (2020). Consumer acceptance of cultured meat: A systematic review. *Meat Science*, 143, 8–17.
- Casino, F., Dasaklis, T. K., ve Patsakis, C. (2019). A systematic literature review of blockchain-based applications. *Telematics and Informatics*, 36, 55–81.
- Deloitte. (2023). 2023 Global Food Industry Outlook.
- FAO. (2023). The State of Food Security and Nutrition in the World 2023. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Galanakis, C. M. (2021). Functionality of food components and emerging technologies. *Foods*, 10(1), 128.
- Granato, D., ve ark. (2020). Functional foods: Product development, technological trends, efficacy testing, and safety. *Annual Review of Food Science and Technology*, 11, 93–118.
- International Federation of Robotics. (2023). *World Robotics Report 2023*.
- Javaid, M., ve ark. (2022). Understanding the adoption of Industry 4.0 technologies in the food sector. *Food Control*, 138, 109074. .
- Kamble, S. S., Gunasekaran, A., ve Sharma, R. (2020). Modeling the blockchain-enabled traceability in agriculture supply chain. *International Journal of Information Management*, 52, 101967.

- Le Tan, H. (2025). 3D food printing technologies for functional foods: Applications and antioxidant integration. *Food and Humanity*, 5, 100694.
- OECD. (2020). COVID-19 and the Food and Agriculture Sector: Issues and Policy Responses.
- Ordovas, J. M., Ferguson, L. R., Tai, E. S., ve Mathers, J. C. (2018). Personalised nutrition and health. *BMJ*, 361, bmj.k2173.
- Poore, J., ve Nemecek, T. (2018). Reducing food's environmental impacts through producers and consumers. *Science*, 360(6392), 987–992.
- StartUs Insights. (2022). *Top 10 Food Technology Trends ve Innovations in 2022*.
- Statista. (2023). *Online Food Delivery Market Report*.
- Sun, J., Zhou, W., Huang, D., Fuh, J. Y. H., ve Hong, G. S. (2018). An overview of 3D printing technologies for food fabrication. *Food and Bioprocess Technology*, 11, 1605–1615.
- Verdouw, C. N., ve ark. (2021). Digital twins in smart farming. *Agricultural Systems*, 189, 103046.
- Wolfert, S., Ge, L., Verdouw, C., ve Bogaardt, M. J. (2017). Big data in smart farming: A review. *Agricultural Systems*, 153, 69–80.
- World Economic Forum. (2022). Innovation with a Purpose: The Role of Technology in Future Food Systems.

SÜT ENDÜSTRİSİ YAN ÜRÜNLERİNİN FONKSİYONEL GIDA BİLEŞENLERİNE DÖNÜŞTÜRÜLMESİ: UPCYCLING YAKLAŞIMLARI

Ash ERDEM¹

Özge Duygu OKUR²

1. GİRİŞ

1.1. Gıda İsrafı ve Sürdürülebilir Gıda Üretimi

Gıda kayıpları ve israfı, tarımsal üretimden tüketiciye ulaşıncaya kadar gıda tedarik zincirinin farklı aşamalarında ortaya çıkan küresel ölçekte önemli çevresel, ekonomik ve sosyal problemlerdir. Hasat sonrası kayıplar, endüstriyel işleme süreçleri, dağıtım ve tüketim aşamalarında meydana gelen kayıplar; doğal kaynakların verimsiz kullanımına, ekonomik kayıplara ve çevresel yüklerin artmasına neden olmaktadır (Idrishi et al., 2022). Küresel ölçekte insan tüketimi amacıyla üretilen gıdaların önemli bir bölümü, tedarik zincirinin farklı aşamalarında kaybedilmekte veya tüketilmeden atık haline gelmektedir. Bu durum yalnızca gıda arz güvenliği açısından değil; su, enerji ve tarımsal kaynakların sürdürülebilir kullanımı açısından da önemli bir sorun oluşturmaktadır (Gatto & Chepeliev, 2024; Tit et al., 2024). Gıda atıklarının azaltılması ve mevcut biyolojik kaynakların yeniden değerlendirilmesi,

¹ Lisansüstü Öğrenci, Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gıda Güvenliği Anabilim Dalı, Zonguldak, ORCID: 0009-0007-3996-4690.

² Dr. Öğr. Üyesi, Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, Zonguldak, ORCID: 0000-0002-5483-2983.

sürdürülebilir gıda üretim sistemlerinin temel hedeflerinden biri haline gelmiştir. Bu yaklaşım, Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları kapsamında özellikle sorumlu üretim ve tüketim (SDG 12), açlığın azaltılması (SDG 2) ve iklim değişikliğiyle mücadele (SDG 13) hedefleriyle doğrudan ilişkilidir (Idrishi et al., 2022; Mirzakulova et al., 2025; Czarniecka-Skubina et al., 2025). Son yıllarda geleneksel atık yönetimi yaklaşımının ötesine geçilerek, düşük değerlendirilen gıda yan ürünlerinin yüksek katma değerli ürünlere dönüştürülmesi önem kazanmıştır. Bu kapsamda ileri dönüşüm (upcycling) yaklaşımı, sürdürülebilir ve döngüsel gıda sistemlerinin önemli bir bileşeni olarak değerlendirilmektedir (Merino et al., 2026).

1.2. Süt Endüstrisinde Yan Ürün Oluşumu

Süt endüstrisi, yüksek üretim hacmi nedeniyle önemli miktarda yan ürün oluşumunun gerçekleştiği agro-gıda sektörlerinden biridir. Peynir, tereyağı, yoğurt ve diğer süt ürünlerinin üretimi sırasında ortaya çıkan yan ürünlerin miktarı ve bileşimi, uygulanan üretim teknolojisine, proses koşullarına ve ürün çeşidine bağlı olarak değişmektedir (Amjad et al., 2026). Küresel süt üretimindeki artışa paralel olarak süt endüstrisinden kaynaklanan yan ürün miktarı da giderek artmaktadır. Bu yan ürünler arasında en yüksek hacme sahip olan fraksiyonlardan biri peynir altı suyudur (Czarniecka-Skubina et al., 2025). Peynir altı suyu, peynir üretimi sırasında kazeinin enzimatik veya asidik koagülasyonu sonucunda oluşan sıvı fazdır. Yüksek su içeriğine rağmen laktoz, serum proteinleri, mineraller ve çeşitli biyoaktif bileşenler bakımından zengin olması nedeniyle günümüzde yalnızca bir atık akışı olarak değil, fonksiyonel gıda bileşeni elde etmek için değerli bir hammadde olarak değerlendirilmektedir (Pires et al., 2021; Arora & Mali, 2025). Bunun yanında süt yağ küreciği zarı (MFGM), laktoz içeren permeat fraksiyonları ve ikinci peynir

altı suyu gibi yan akışlar da sahip oldukları bileşen profili nedeniyle fonksiyonel gıda uygulamalarında değerlendirilebilecek potansiyele sahiptir (Pan et al., 2023; Mirzakulova et al., 2025). Bu nedenle modern süt endüstrisinde yaklaşım, yan ürünlerin bertaraf edilmesinden ziyade içerdiği değerli bileşenlerin geri kazanılması ve yeniden gıda sistemine kazandırılması yönünde değişmektedir.

1.3. Upcycling Kavramı ve Fonksiyonel Gıda İlişkisi

Upcycling (ileri dönüşüm), geleneksel olarak atık veya düşük değerli kabul edilen materyallerin, besinsel ve ekonomik açıdan daha yüksek değer taşıyan yeni ürünlere dönüştürülmesini ifade etmektedir (Idrishi et al., 2022; Amjad et al., 2026). Gıda sektöründe upcycling yaklaşımı; üretim süreçlerinde ortaya çıkan yan ürünlerin, insan tüketimine uygun, güvenilir ve fonksiyonel özellik taşıyan gıda bileşenlerine dönüştürülmesini amaçlamaktadır. Bu yaklaşım, atık miktarının azaltılmasının yanı sıra mevcut besin kaynaklarının daha etkin kullanılmasına katkı sağlamaktadır (Bangar et al., 2024). Süt yan ürünleri, proteinler, laktoz, mineraller, süt lipidleri ve biyoaktif bileşenler açısından zengin olmaları nedeniyle ileri dönüşüm uygulamaları için önemli kaynaklardır. Özellikle serum proteinlerinden elde edilen biyoaktif peptitler; antioksidan, antihipertansif ve antimikrobiyal özellikleri nedeniyle fonksiyonel gıda geliştirme çalışmalarında dikkat çekmektedir (Mirzakulova et al., 2025; Pires et al., 2021). Bununla birlikte laktozdan türetilen prebiyotik bileşenler, fermentasyon ürünleri ve postbiyotik metabolitler de süt yan ürünlerinin fonksiyonel gıda sektöründeki kullanım alanlarını genişletmektedir (Czarniecka-Skubina et al., 2025). Artan tüketici talebi doğrultusunda doğal içerikli, sürdürülebilir ve sağlık destekleyici ürünlere olan ilginin artması, süt yan ürünlerinin fonksiyonel gıda üretiminde değerlendirilmesini

stratejik bir konu haline getirmiştir (Aschemann-Witzel et al., 2023; Mota et al., 2026).

Bu kitap bölümünde süt endüstrisinde oluşan başlıca yan ürünlerin bileşimi, upcycling yaklaşımlarıyla fonksiyonel gıda bileşenlerine dönüştürülmesi, kullanılan teknolojiler ve elde edilen ürünlerin sürdürülebilir gıda sistemlerindeki rolü ele alınacaktır.

2. SÜT ENDÜSTRİSİ YAN ÜRÜNLERİ

2.1. Peynir Altı Suyu (Whey)

Peynir altı suyu, peynir üretimi sırasında kazeinin asidik veya enzimatik koagülasyonu sonucunda pıhtıdan ayrılan sıvı fazdır. Geçmişte çoğunlukla çevresel yük oluşturan bir yan ürün olarak değerlendirilmesine rağmen, içerdiği değerli besin bileşenleri nedeniyle günümüzde fonksiyonel gıda üretimi açısından önemli bir hammadde kaynağı olarak kabul edilmektedir (Arora & Mali, 2025; Pires et al., 2021). Peynir altı suyu, sütün suda çözünen bileşenlerinin önemli bir bölümünü içermektedir. Başlıca bileşenleri arasında laktoz, serum proteinleri (β -laktoglobulin, α -laktalbümin, immünoglobulinler ve laktoferrin), mineraller, suda çözünen vitaminler ve düşük miktarda süt yağı bulunmaktadır (Khetu et al., 2025; Czarniecka-Skubina et al., 2025). Protein fraksiyonunun yüksek biyolojik değeri ve sahip olduğu fonksiyonel özellikler nedeniyle peynir altı suyu; protein konsantreleri, protein izolatları, fermente içecekler, biyoaktif peptitler ve çeşitli fonksiyonel gıda uygulamalarında değerlendirilmektedir (Mirzakulova et al., 2025; Pires et al., 2021). Peynir altı suyu temel olarak üretim yöntemine bağlı olarak iki ana gruba ayrılmaktadır:

Tatlı Peynir Altı Suyu (Sweet Whey): Tatlı peynir altı suyu, genellikle şirden enzimi kullanılarak gerçekleştirilen peynir üretimi sırasında oluşmaktadır. Kazeinin enzimatik olarak çöktürülmesi sonucunda elde edilen bu fraksiyon, daha yüksek pH değeri ve protein içeriği nedeniyle özellikle serum proteinlerinin geri kazanımı açısından avantaj sağlamaktadır (Arora & Mali, 2025; Mota et al., 2026). Tatlı peynir altı suyunda bulunan β -laktoglobulin ve α -laktalbümin gibi serum proteinleri, fonksiyonel özellikleri ve biyolojik aktiviteleri nedeniyle değerli bileşenler arasında yer almaktadır (Mirzakulova et al., 2025).

Asidik Peynir Altı Suyu (Acid Whey): Asidik peynir altı suyu, yoğurt, lor ve asit koagülasyonu ile üretilen peynir çeşitlerinde oluşmaktadır. Düşük pH değeri ve daha yüksek mineral içeriği nedeniyle tatlı peynir altı suyundan farklı teknolojik özellikler göstermektedir (Mota et al., 2026; Czarniecka-Skubina et al., 2025). Asidik peynir altı suyunun özellikle kalsiyum, fosfor ve diğer mineral bileşenler açısından zengin olması, mineral takviyeli fonksiyonel ürün geliştirme açısından önem taşımaktadır (Mutaliyeva et al., 2025).

2.2. Lor ve Peynir Üretimi Yan Ürünleri

Peynir üretim süreçlerinde oluşan yan ürünler yalnızca ilk peynir altı suyuyla sınırlı değildir. Peynir altı suyunun ileri işlemlerden geçirilmesi sırasında protein, yağ ve mineral içeriği bakımından farklı özelliklere sahip çeşitli yan akışlar meydana gelebilmektedir (Pires et al., 2021; Czarniecka-Skubina et al., 2025). Peynir altı suyunda bulunan yağ fraksiyonu, separasyon işlemleri ile ayrılarak krem peynir altı suyu olarak değerlendirilebilir. Bu fraksiyon, tereyağı üretimi veya süt ürünlerinin standardizasyonunda yeniden kullanılabilir (Zeng et al., 2023; Fancello et al., 2024). Bunun yanında peynir altı suyunda kalan serum proteinleri, ısıl işlem ve uygun pH

koşulları ile çöktürülerek farklı peynir çeşitlerinin üretiminde değerlendirilmektedir. Bu yöntemle elde edilen ürünler arasında İtalya’da Ricotta, Portekiz’de Requeijão ve Türkiye’de lor peyniri gibi geleneksel ürünler bulunmaktadır (Fancello et al., 2024; Czarniecka-Skubina et al., 2025). Bu uygulamalar, peynir altı suyundaki proteinlerin yeniden değerlendirilmesini sağlayarak hem çevresel yükün azaltılmasına hem de ekonomik değerin artırılmasına katkı sağlamaktadır.

2.3. İkinci Peynir Altı Suyu (Second Cheese Whey / Sorelho / Scotta)

Peynir altı suyundan proteinlerin geri kazanılması amacıyla uygulanan işlemler sonucunda geriye kalan sıvı fraksiyon, ikinci peynir altı suyu olarak tanımlanmaktadır. Bu fraksiyon farklı ülkelerde sorelho veya scotta gibi isimlerle de bilinmektedir (Mota et al., 2026; Pires et al., 2021). İkinci peynir altı suyu, ilk peynir altı suyuna kıyasla daha düşük protein içeriğine sahip olmakla birlikte yüksek miktarda laktoz ve çözünür mineraller içermektedir (Tit et al., 2024; Sciuto et al., 2025). Laktoz açısından zengin olması nedeniyle kontrolsüz şekilde çevreye bırakıldığında yüksek biyolojik ve kimyasal oksijen ihtiyacına neden olabilmektedir. Bu durum su kaynaklarında oksijen azalması ve ekolojik dengenin bozulması gibi çevresel problemlere yol açabilmektedir (Pires et al., 2021). Bununla birlikte sahip olduğu laktoz içeriği, ikinci peynir altı suyunu mikrobiyal fermentasyon süreçleri için uygun bir substrat haline getirmektedir. Bu nedenle organik asit, biyolojik aktif metabolit ve fonksiyonel bileşen üretiminde değerlendirilmesi sürdürülebilir süt endüstrisi açısından önemlidir (Mota et al., 2026).

2.4. Süt Yağ Küreciği Zarı (Milk Fat Globule Membrane, MFGM)

Süt yağ küreciği zarı (MFGM), süt yağ damlacıklarını çevreleyen kompleks lipid-protein yapısındaki biyolojik bir membrandır. Süt işleme süreçlerinde tereyağı altı suyu, yayık altı suyu ve bazı peynir altı suyu fraksiyonlarından geri kazanılabilmektedir (Pan et al., 2023). MFGM yapısında fosfolipitler, sfingolipitler, glikolipitler, kolesterol ve çeşitli membran proteinleri bulunmaktadır. Bu bileşenler nedeniyle MFGM, yalnızca bir süt yan ürünü değil, aynı zamanda fonksiyonel gıda bileşeni olarak değerlendirilen biyolojik açıdan zengin bir matriks olarak kabul edilmektedir (Nie et al., 2024). MFGM bileşenleri özellikle bağırsak sağlığı, inflamasyon kontrolü ve hücresel fonksiyonlarla ilişkili biyolojik etkileri nedeniyle araştırılmaktadır. Bu nedenle bebek beslenmesi ürünleri, sporcu ürünleri ve sağlık odaklı gıda formülasyonlarında kullanım potansiyeline sahiptir (da Silva et al., 2021; France et al., 2025).

2.5. Laktoz İçeren Yan Ürünler

Laktoz, peynir altı suyunun en önemli karbonhidrat bileşenidir ve toplam kuru maddede önemli bir paya sahiptir (Pires et al., 2021). Peynir altı suyunun membran filtrasyonu ile protein fraksiyonları ayrıldığında, laktoz ve mineraller açısından zengin permeat fraksiyonu elde edilmektedir. Bu fraksiyon, doğrudan tüketim yerine genellikle biyoteknolojik dönüşüm süreçlerinde değerlendirilmektedir (Mirzakulova et al., 2025). Laktoz, β -galaktozidaz enzimi kullanılarak glikoz ve galaktoza dönüştürülebileceği gibi, prebiyotik özellik gösteren galaktooligosakkarit (GOS), laktuloz ve laktitol gibi bileşenlerin üretiminde de kullanılabilmektedir. Bu nedenle laktoz içeren süt yan ürünleri, atık olarak değerlendirilmek yerine fonksiyonel gıda bileşenlerinin üretiminde kullanılabilecek değerli biyolojik

kaynaklar olarak görülmektedir (Czarniecka-Skubina et al., 2025).

3. SÜT YAN ÜRÜNLERİNİN UPCYCLING TEKNOLOJİLERİ

Süt endüstrisi yan ürünlerinin fonksiyonel gıda bileşenlerine dönüştürülmesi için farklı fiziksel, kimyasal ve biyoteknolojik yaklaşımlar kullanılmaktadır. Bu teknolojilerin temel amacı; yan ürünlerde bulunan protein, laktoz, mineral, lipid ve biyoaktif bileşenlerin seçici olarak geri kazanılması, fonksiyonel özelliklerinin artırılması ve yüksek katma değerli ürünlere dönüştürülmesidir (Idrishi et al., 2022; Czarniecka-Skubina et al., 2025). Geleneksel atık yönetimi yaklaşımlarının aksine upcycling teknolojileri, süt yan ürünlerini bertaraf edilmesi gereken materyaller olarak değil, yeni nesil gıda üretimi için değerlendirilebilir biyolojik kaynaklar olarak ele almaktadır (Dadhaneeya et al., 2024).

3.1. Membran Filtrasyon Teknolojileri

Membran filtrasyon teknolojileri, süt endüstrisinde bileşenlerin molekül büyüklüğü ve özelliklerine göre ayrılmasını sağlayan önemli ayırma yöntemlerinden biridir. Bu teknolojiler düşük sıcaklıklarda uygulanabildiği için proteinlerin ve diğer hassas biyoaktif bileşiklerin yapısal bütünlüğünün korunmasına katkı sağlamaktadır (Bihola et al., 2026). Peynir altı suyunun değerlendirilmesinde en yaygın kullanılan membran sistemleri mikrofiltrasyon, ultrafiltrasyon, nanofiltrasyon ve ters ozmoz olarak sınıflandırılmaktadır.

Mikrofiltrasyon (MF): Mikrofiltrasyon, peynir altı suyunda bulunan askıda katı maddelerin, yağ globüllerinin, kazein kalıntılarının ve mikrobiyal yükün azaltılması amacıyla uygulanmaktadır. Bu işlem genellikle diğer membran

sistemlerinden önce ön işlem olarak kullanılmaktadır. MF uygulaması, sonraki konsantrasyon işlemlerinin verimliliğini artırarak membran tıkanması (fouling) probleminin azaltılmasına yardımcı olmaktadır (Czarniecka-Skubina et al., 2025).

Ultrafiltrasyon (UF): Ultrafiltrasyon, özellikle peynir altı suyundan proteinlerin geri kazanılmasında en önemli teknolojilerden biridir. Bu işlem sırasında yüksek molekül ağırlığına sahip serum proteinleri membranda tutulurken, laktoz ve mineral maddeler permeat fazına geçmektedir (Mirzakulova et al., 2025). UF sonucunda elde edilen peynir altı suyu protein konsantresi (WPC) ve peynir altı suyu protein izolatu (WPI), yüksek protein içerikleri ve fonksiyonel özellikleri nedeniyle sporcu ürünleri, protein içecekleri ve fonksiyonel gıda formülasyonlarında kullanılmaktadır (Czarniecka-Skubina et al., 2025).

Nanofiltrasyon (NF): Nanofiltrasyon, özellikle laktoz ve mineral fraksiyonlarının ayrılmasında kullanılan daha seçici bir membran teknolojisidir. Bu sistem sayesinde peynir altı suyunun mineral içeriği azaltılabilmekte ve laktoz konsantrasyonu artırılabilmektedir. Elde edilen laktoz bakımından zengin fraksiyonlar, prebiyotik bileşen üretimi veya fermentasyon süreçlerinde değerlendirilebilmektedir (Güneş, 2026).

Ters Ozmoz (RO): Ters ozmoz, su moleküllerinin membrandan geçirilerek süt yan ürünlerinin konsantre edilmesini sağlayan bir teknolojidir. Özellikle peynir altı suyunun su içeriğinin azaltılması ve suyun yeniden kullanımına olanak sağlaması nedeniyle sürdürülebilir üretim açısından önem taşımaktadır (Kravtsov et al., 2026).

3.2. Enzimatik Dönüşüm Teknolojileri

Enzimatik dönüşüm, süt yan ürünlerinde bulunan makromoleküllerin daha küçük ve biyolojik olarak aktif

bileşenlere dönüştürülmesini sağlayan kontrollü bir biyoteknolojik yaklaşımdır. Özellikle peynir altı suyu proteinleri, proteolitik enzimler kullanılarak hidrolize edilmekte ve biyoaktif peptitler içeren protein hidrolizatları elde edilmektedir (Rodrigues et al., 2024). Tripsin, pepsin, papain ve ticari proteazlar gibi enzimlerin kullanıldığı bu süreçte protein yapısı daha küçük peptitlere ayrılır. Böylece; çözünürlük, emülsifikasyon kapasitesi, köpük oluşturma özelliği, sindirilebilirlik gibi teknolojik özellikler geliştirilebilmektedir (Mirzakulova et al., 2025). Ayrıca enzimatik hidroliz sonucunda açığa çıkan bazı peptitlerin; ACE inhibitör aktivite, antioksidan özellik, antimikrobiyal etki, bağışıklık düzenleyici özellik gibi fonksiyonel etkiler gösterebildiği bildirilmektedir (Meleti et al., 2025). Laktoz içeren yan ürünlerin değerlendirilmesinde ise β -galaktozidaz enzimi önemli bir role sahiptir. Bu enzim aracılığıyla laktoz, glikoz ve galaktoza parçalanabilmekte veya prebiyotik özellik gösteren galaktooligosakkaritlerin (GOS) üretiminde kullanılabilmektedir (Czarniecka-Skubina et al., 2025).

3.3. Fermantasyon Temelli Yaklaşımlar

Fermantasyon, süt yan ürünlerinin fonksiyonel gıda bileşenlerine dönüştürülmesinde en eski ve etkili biyoteknolojik yöntemlerden biridir. Peynir altı suyunun yüksek laktoz içeriği, farklı mikroorganizmaların büyümesi için uygun bir ortam oluşturmaktadır. Bu nedenle fermantasyon yoluyla çeşitli organik asitler, vitaminler, antimikrobiyal metabolitler ve biyoaktif bileşenler üretilmektedir (Malos et al., 2025).

Laktik Asit Fermantasyonu: Laktik asit bakterileri (LAB), peynir altı suyundaki laktozu metabolize ederek laktik asit ve çeşitli ikincil metabolitler üretmektedir. Bu süreç; pH düşüşü, mikrobiyal stabilitenin artması, duyuşal özelliklerin geliştirilmesi gibi avantajlar sağlamaktadır. Ayrıca bazı LAB

türlerinin fermentasyon sırasında ürettiği metabolitler postbiyotik bileşenler olarak değerlendirilmektedir (Czarniecka-Skubina et al., 2025).

Maya Fermentasyonu: Laktozu fermente edebilen bazı maya türleri, peynir altı suyunu etanol, aroma bileşikleri ve çeşitli biyoteknolojik ürünlerin üretiminde kullanabilmektedir. Özellikle *Kluyveromyces* türleri, β -galaktozidaz aktiviteleri nedeniyle laktoz dönüşümünde yaygın olarak araştırılmaktadır (Amjad et al., 2026).

3.4. Yeni Nesil ve Yeşil Teknolojiler

Süt yan ürünlerinin değerlendirilmesinde son yıllarda enerji tüketimini azaltan ve biyoaktif bileşen kaybını önleyen yenilikçi teknolojilere ilgi artmıştır. Bu teknolojiler, geleneksel ısı işlemlerin neden olduğu protein denatürasyonu veya besin kayıplarını azaltmayı amaçlamaktadır (Waseem et al., 2024).

Ultrason Destekli İşlemler: Ultrason uygulamaları, kavitasyon etkisi sayesinde moleküler yapıda değişiklik oluşturarak ekstraksiyon ve enzimatik işlemlerin etkinliğini artırabilmektedir. Özellikle protein fonksiyonelliğinin geliştirilmesi ve membran işlemlerinde verim artışı sağlanması amacıyla kullanılmaktadır (Rathnakumar et al., 2024).

Mikrodalga Destekli Teknolojiler: Mikrodalga uygulamaları, hızlı ve hacimsel ısı transferi sağlayarak bazı biyopolimerlerin yapısal özelliklerini değiştirebilmektedir. Bu nedenle ekstraksiyon ve dönüşüm süreçlerinde alternatif bir yöntem olarak değerlendirilmektedir (Zaky et al., 2022).

Darbeli Elektrik Alan (PEF): PEF teknolojisi, kısa süreli yüksek elektrik alan uygulamaları ile hücre geçirgenliğini değiştiren bir yöntemdir. Süt yan ürünlerinde mikrobiyal kontrol, ekstraksiyon verimi ve fonksiyonel özelliklerin geliştirilmesi amacıyla araştırılmaktadır (Vashisht et al., 2024).

Ohmik Isıtma: Ohmik ısıtma, elektrik akımının ürün içerisinden geçirilmesiyle hacimsel ve hızlı ısı transferi sağlayan yenilikçi bir teknolojidir. Geleneksel ısı işlemlere kıyasla daha kısa işlem süresi gerektirmesi ve sıcaklık dağılımının daha homojen olması nedeniyle süt yan ürünlerinden elde edilen proteinlerin fonksiyonel özelliklerinin korunmasına katkı sağlayabilmektedir. Bu teknoloji, enerji verimliliği ve ürün kalitesini birlikte iyileştirebilmesi nedeniyle sürdürülebilir süt işleme proseslerinde gelecek vadeden yöntemlerden biri olarak değerlendirilmektedir (Neokleous et al., 2022).

4. SÜT YAN ÜRÜNLERİNDEN FONKSİYONEL BİLEŞEN ÜRETİMİ

Süt endüstrisi yan ürünleri; proteinler, peptitler, laktoz, mineraller, fosfolipitler ve çeşitli biyoaktif bileşenler açısından zengin yapıları nedeniyle yalnızca besin kaynağı değil, aynı zamanda fonksiyonel gıda bileşeni üretiminde kullanılabilecek önemli biyolojik materyaller olarak değerlendirilmektedir. Özellikle peynir altı suyu ve türevlerinden elde edilen bileşenler; antioksidan, antihipertansif, antimikrobiyal ve bağışıklık düzenleyici özellikleri nedeniyle yeni nesil fonksiyonel ürün geliştirme çalışmalarında yaygın olarak araştırılmaktadır (Pires et al., 2021; Mirzakulova et al., 2025).

4.1. Biyoaktif Peptitler

Süt proteinleri, aminoasit dizileri içerisinde biyolojik olarak aktif özellik gösterebilen peptit dizilerini doğal olarak bulundurabilmektedir. Ancak bu peptitler çoğunlukla ana protein yapısı içerisinde inaktif formda bulunur ve proteolitik işlemler sonucunda serbest hale geçerek fonksiyonel özellik kazanırlar (Rodrigues et al., 2024). Peynir altı suyu proteinleri içerisinde özellikle β -laktoglobulin, α -laktalbümin, laktoferrin ve immünoglobulinler biyoaktif peptitlerin önemli

kaynaklarıdır. Bu peptitlerin biyolojik aktiviteleri; aminoasit dizilimine, moleküler ağırlığına, hidrofobik karakterine ve sindirim sırasında serbestleşme durumuna bağlı olarak değişmektedir (Zaky et al., 2022).

Antihipertansif Aktivite: Süt kaynaklı biyoaktif peptitlerin en fazla araştırılan etkilerinden biri antihipertansif aktivitedir. Bazı peptitlerin, kan basıncının düzenlenmesinde görev alan renin-anjiyotensin sistemi içerisinde bulunan anjiyotensin dönüştürücü enzimi (ACE) inhibe ettiği bildirilmektedir. ACE enziminin baskılanması sonucunda damar daraltıcı özellik gösteren anjiyotensin II oluşumu azalmakta ve damar gevşemesini destekleyen mekanizmalar ortaya çıkabilmektedir. Bu nedenle peynir altı suyu protein hidrolizatları ve fermente süt ürünleri, hipertansiyon yönetimine destek olabilecek fonksiyonel bileşen kaynakları olarak değerlendirilmektedir (Mota et al., 2026).

Antioksidan Aktivite: Süt proteinlerinden elde edilen bazı peptitler, serbest radikallerin uzaklaştırılması ve oksidatif stresin azaltılması açısından potansiyel göstermektedir. Özellikle tirozin, triptofan, histidin ve sistein içeren peptitlerin; serbest radikal yakalama, metal iyonlarını bağlama, lipid oksidasyonunu azaltma gibi mekanizmalarla antioksidan aktivite gösterebildiği belirtilmektedir. Bu özellik, süt yan ürünlerinden elde edilen protein hidrolizatlarının oksidatif stresle ilişkili fonksiyonel ürünlerde kullanımını desteklemektedir (Zaky et al., 2022).

Antimikrobiyal Aktivite: Bazı süt kaynaklı peptitler, mikroorganizmaların hücre zarlarıyla etkileşime girerek antimikrobiyal etki gösterebilmektedir. Pozitif yüklü ve amfipatik özellik taşıyan bu peptitler, özellikle bakteriyel membran bütünlüğünü bozarak mikrobiyal gelişimi sınırlandırabilmektedir. Bu özellikleri nedeniyle biyoaktif

peptitler, doğal koruyucu bileşen geliştirme çalışmalarında da değerlendirilmektedir (Rodrigues et al., 2024).

İmmün Düzenleyici ve Anti-inflamatuvar Etkiler: Bazı süt protein kaynaklı peptitlerin bağışıklık sistemi hücreleri üzerinde düzenleyici etkiler gösterebildiği bildirilmektedir. Bu bileşenlerin inflamasyonla ilişkili bazı sinyal yollarını etkileyerek proinflamatuvar yanıtların sınırlandırılmasına katkı sağlayabileceği belirtilmektedir. Bununla birlikte bu etkilerin önemli bir kısmı laboratuvar ve hayvan çalışmaları düzeyinde olup, insan sağlığı üzerindeki kesin etkilerin belirlenmesi için daha fazla klinik çalışmaya ihtiyaç vardır (Mota et al., 2026).

4.2. Probiyotik Ürünler ve Postbiyotik Bileşenler

Süt yan ürünleri, özellikle peynir altı suyu, mikroorganizmaların gelişimi için uygun karbon ve mineral kaynağı sağlaması nedeniyle fermentasyon temelli fonksiyonel ürün geliştirme çalışmalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Peynir altı suyunda gerçekleştirilen fermentasyon sonucunda yalnızca canlı probiyotik mikroorganizmalar içeren ürünler değil, aynı zamanda inaktive edilmiş mikrobiyal hücreler ve bunların bileşenlerini içeren postbiyotik preparatlar da geliştirilebilmektedir. Uluslararası Probiyotik ve Prebiyotik Bilimsel Derneği (ISAPP), postbiyotikleri "konakçıya sağlık yararı sağlayan inaktive edilmiş mikroorganizmalar ve/veya bunların bileşenlerini içeren preparatlar" olarak tanımlamaktadır (Salminen et al., 2021). Fermentasyon sürecinde ayrıca asetat, propiyonat ve bütirat gibi kısa zincirli yağ asitleri, organik asitler, bakteriyosinler ve ekzopolisakkaritler gibi çok sayıda biyoaktif mikrobiyal metabolit oluşabilmektedir. Bu bileşiklerin bağırsak mikrobiyotasının düzenlenmesi, immün yanıtın modülasyonu ve metabolik sağlığın desteklenmesi üzerinde olumlu etkiler gösterebildiği bildirilmektedir. Peynir altı suyunun postbiyotik üretiminde değerlendirilmesi, canlı

probiyotik hücrelerin depolama ve raf ömrü boyunca karşılaşılan stabilite sorunlarının azaltılmasına katkı sağlayabilmekte ve fonksiyonel gıda geliştirilmesi açısından önemli bir alternatif sunmaktadır (Vinderola et al., 2022).

4.3. Peynir Altı Suyu Protein Konsantreleri ve İzolatları (WPC/WPI)

Peynir altı suyu proteinlerinin geri kazanılmasında membran filtrasyon teknolojileri önemli bir yere sahiptir. Ultrafiltrasyon ile proteinlerin konsantre edilmesi sonucunda peynir altı suyu protein konsantresi (WPC) elde edilirken, ileri saflaştırma işlemleri ile daha yüksek protein içeriğine sahip peynir altı suyu protein izolatları (WPI) üretilmektedir (Czarniecka-Skubina et al., 2025). WPC ve WPI ürünleri; yüksek biyolojik değer, dengeli aminoasit profili, iyi çözünürlük, emülsifikasyon kapasitesi, jel oluşturma yeteneği nedeniyle farklı fonksiyonel gıda uygulamalarında kullanılmaktadır. Bu bileşenler özellikle sporcu beslenmesi ürünleri, yüksek proteinli içecekler, enteral beslenme ürünleri, yaşlı beslenmesine yönelik ürünler için önemli hammaddeler arasında yer almaktadır (Mirzakulova et al., 2025).

5. SÜT YAN ÜRÜNLERİNİN FONKSİYONEL GIDA UYGULAMALARI

Son yıllarda süt endüstrisinde yan ürünlerin değerlendirilmesine yönelik yaklaşım, klasik “atık yönetimi” perspektifinden uzaklaşarak “yüksek katma değerli fonksiyonel bileşen üretimi” eksenine kaymıştır. Süt endüstrisi yan ürünlerinden elde edilen bileşenler; yüksek besin değerleri, fonksiyonel özellikleri ve sürdürülebilir üretim avantajları nedeniyle farklı gıda kategorilerinde değerlendirilmektedir. Özellikle peynir altı suyu proteinleri, laktoz türevleri, mineral fraksiyonları ve fermentasyon ürünleri; içeceklerden fermente

ürünlere, sporcu beslenmesi ürünlerinden sağlıklı atıştırıcılara kadar geniş kullanım alanına sahiptir. Bu uygulamalarda temel amaç, yan ürünleri yalnızca yeniden kullanmak değil; aynı zamanda tüketici sağlığına katkı sağlayabilecek yeni fonksiyonel ürünler geliştirmektir (El-Aidie & Khalifa, 2024; Zeng et al., 2023; Czarniecka-Skubina et al., 2025).

Bu bağlamda “upcycling” yaklaşımı, süt yan ürünlerini yalnızca geri kazanılan hammadde olarak değil, aynı zamanda yeni nesil fonksiyonel gıda sistemlerinin temel bileşenleri olarak konumlandırmaktadır (O’Donoghue & Murphy, 2023).

5.1. Fonksiyonel İçecek Uygulamaları

Peynir altı suyu, yüksek su içeriği, düşük yağ oranı ve sahip olduğu protein-mineral dengesi nedeniyle fonksiyonel içecek üretimi için uygun bir matriks oluşturmaktadır. Peynir altı suyu proteinlerinde bulunan esansiyel aminoasitler ve biyoaktif bileşenler, bu ürünlerin besleyici değerini artırmaktadır (Arora & Mali, 2025). Bununla birlikte peynir altı suyunun doğal rengi, hafif asidik aroması ve düşük viskozitesi tüketici kabulünü etkileyebilecek faktörlerdir. Bu nedenle ürün geliştirme çalışmalarında genellikle meyve bileşenleri, doğal aromalar veya bitkisel ekstraktlarla kombinasyonlar uygulanmaktadır (Mirzakulova et al., 2025). Örneğin meyve suyu veya meyve püresi ile zenginleştirilmiş peynir altı suyu içeceklerinde duyuusal kabulün artırılması, fenolik bileşik içeriğinin yükseltilmesi, antioksidan kapasitenin geliştirilmesi amaçlanmaktadır. Bu tür kombinasyonlar sayesinde peynir altı suyu yalnızca protein kaynağı olarak değil, aynı zamanda fonksiyonel bileşen taşıyıcısı olarak değerlendirilmektedir (El-Aidie & Khalifa, 2024; Zeng et al., 2023). Bu ürünler sporcu beslenmesi için protein destekli içecekler, rehidrasyon amaçlı fonksiyonel içecekler, düşük yağlı ve yüksek proteinli alternatif

içecekler olarak pazarda yer bulmaktadır. Ayrıca whey permeatın içecek formülasyonlarında kullanımı, laktozun tatlandırıcı veya prebiyotik substrat olarak değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır (O'Donoghue & Murphy, 2023).

5.2. Sporcu Beslenmesi Ürünleri ve Yüksek Proteinli Ürünler

Peynir altı suyu proteinleri, yüksek biyolojik değerleri ve dengeli aminoasit kompozisyonları nedeniyle sporcu beslenmesi alanında en yaygın kullanılan süt kaynaklı bileşenlerden biridir. Özellikle dallı zincirli aminoasitler (BCAA; lösin, izolösin ve valin), kas protein sentezi ile ilişkili metabolik süreçlerde önemli rol oynamaktadır (Pires et al., 2021). WPC ve WPI formundaki peynir altı suyu proteinleri; protein barları, protein içecekleri, toz karışımlar, öğün destek ürünleri gibi çeşitli ürünlerde kullanılmaktadır. Ayrıca yüksek sindirilebilirliği nedeniyle yaşlı bireylerin beslenmesine yönelik protein zenginleştirilmiş ürünlerde de potansiyel kullanım alanına sahiptir. Özellikle yaşa bağlı kas kaybının önlenmesinde yeterli protein alımı önemli bir beslenme stratejisi olarak değerlendirilmektedir (Mirzakulova et al., 2025).

5.3. Fonksiyonel Jöle ve Atıştırmalık Ürünler

Süt yan ürünlerinin değerlendirilmesinde dikkat çeken yeni uygulamalardan biri de protein esaslı fonksiyonel atıştırmalıkların geliştirilmesidir. Peynir altı suyu proteinleri, jel oluşturma ve su tutma özellikleri nedeniyle hidrojel bazlı ürünlerde yapı oluşturuca bileşen olarak kullanılabilir (Jiang et al., 2024). Özellikle jelatin, meyve bileşenleri veya bitkisel biyoaktiflerle birlikte kullanıldığında; tekstürel özelliklerin geliştirilmesi, besin değerinin artırılması, fonksiyonel bileşenlerin taşınması sağlanabilmektedir (Fluerasu et al., 2025). Meyvelerden gelen fenolik bileşiklerin peynir altı suyu proteinleriyle etkileşime girmesi, ürünün antioksidan

kapasitesini artırabilmektedir. Bu nedenle peynir altı suyu temelli jöleler, geleneksel şekerleme ürünlerine alternatif daha besleyici atıştırılmalıklar olarak değerlendirilmektedir (Saadi et al., 2024).

5.4. Fermente İçecekler: Kefir ve Benzeri Ürünler

Peynir altı suyunun fermentasyon yoluyla değerlendirilmesi, sürdürülebilir fonksiyonel ürün geliştirme açısından en fazla araştırılan yaklaşımlardan biridir. Peynir altı suyu, içerdiği laktoz, mineraller ve protein fraksiyonları sayesinde mikroorganizmaların gelişimi için uygun bir fermentasyon ortamı sağlayabilmektedir. Kefir benzeri fermente içeceklerde peynir altı suyu, laktik asit bakterileri ve mayaların metabolik aktiviteleri sonucunda organik asitler, aroma bileşenleri ve çeşitli mikrobiyal metabolitlerin oluşumuna olanak sağlamaktadır (Bandara et al., 2023). Fermentasyon sonucunda ürünlerin sindirilebilirliği, duyuşal özellikleri ve biyolojik aktiviteleri iyileşebilmekte; ayrıca whey proteinlerinin fermentasyon sırasında oluşan biyoaktif peptitler ve diğer metabolitler aracılığıyla fonksiyonel özellikleri artırılabilir (Zeng et al., 2023). Fermente peynir altı suyu ürünleri, canlı probiyotik mikroorganizmalar içeren ürünler olarak değerlendirilebildiği gibi, mikrobiyal fermentasyon sonucu oluşan biyoaktif metabolitler bakımından zengin yeni nesil fonksiyonel gıda sistemleri olarak da önem taşımaktadır (Czarniecka-Skubina et al., 2025).

5.5. Prebiyotik ve Biyoteknolojik Ürün Uygulamaları

Peynir altı suyu permeatı ve laktoz içeren fraksiyonlar, prebiyotik bileşenlerin üretimi açısından önemli kaynaklardır. Laktozun enzimatik veya mikrobiyal dönüşümü sonucunda elde edilen galaktooligosakkaritler (GOS), bağırsak mikrobiyotasını destekleyebilen prebiyotik bileşenler arasında yer almaktadır (Costa et al., 2025). Bu bileşenler; fermente süt ürünleri,

içecekler, bebek ve yetişkin beslenmesi ürünleri gibi farklı fonksiyonel gıda uygulamalarında kullanılabilmektedir.

Yeni nesil süt yan ürünü bazlı fonksiyonel gıdalar, yalnızca beslenme kalitesini artırmakla kalmayıp aynı zamanda sürdürülebilir üretim sistemlerine geçişte kritik rol oynamaktadır. Süt yan ürünlerinin protein, karbonhidrat, lipid ve biyoaktif bileşen kaynağı olarak entegre kullanımıyla hem çevresel yükün azaltıldığı hem de yeni ekonomik değer zincirlerinin oluşturulduğu ortaya koyulmuştur (El-Aidie & Khalifa, 2024; O'Donoghue & Murphy, 2023; Merino et al., 2026).

6. SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK, DÖNGÜSEL EKONOMİ VE EKONOMİK ETKİLER

Gıda sistemlerinde sürdürülebilirlik yaklaşımı, yalnızca üretim miktarının artırılması değil; kaynakların etkin kullanılması, atık oluşumunun azaltılması ve mevcut kaynakların yeniden değerlendirilmesi prensiplerine dayanmaktadır. Süt endüstrisi, yüksek üretim hacmi nedeniyle önemli miktarda yan ürün oluşturan sektörlerden biridir. Bu nedenle süt yan ürünlerinin upcycling yaklaşımlarıyla fonksiyonel bileşenlere dönüştürülmesi, döngüsel ekonomi uygulamalarının önemli örneklerinden biri olarak değerlendirilmektedir (Dadhaneeya et al., 2024).

6.1. Çevresel Faydalar ve Yaşam Döngüsü Yaklaşımı (LCA)

Peynir altı suyu ve diğer süt yan ürünlerinin kontrolsüz şekilde çevreye bırakılması, yüksek organik madde içerikleri nedeniyle önemli çevresel problemlere neden olabilmektedir. Özellikle laktoz ve protein fraksiyonlarının yüksek olması, bu yan ürünlerin biyolojik oksijen ihtiyacını (BOİ) ve kimyasal

oksijen ihtiyacını (KOİ) artırmaktadır (Pires et al., 2021). Bu nedenle peynir altı suyunun arıtılmadan uzaklaştırılması; su kaynaklarında oksijen azalmasına, mikrobiyal dengenin bozulmasına, ötrofikasyon riskinin artmasına neden olabilmektedir. Upcycling temelli yaklaşımlar ise bu organik yükü azaltırken, aynı zamanda mevcut besin bileşenlerinin gıda zincirine yeniden kazandırılmasını sağlamaktadır (Udourioh et al., 2025). Yaşam döngüsü analizi (Life Cycle Assessment, LCA) çalışmaları; yan ürünlerin doğrudan bertaraf edilmesi yerine gıda veya biyoteknolojik süreçlerde değerlendirilmesinin, üretim sistemlerinin çevresel etkilerini azaltabileceğini göstermektedir. Özellikle; su kullanımının azaltılması, atık arıtma yükünün düşürülmesi, yeni hammadde ihtiyacının azaltılması döngüsel üretim modellerinin temel avantajları arasında yer almaktadır (Mirzakulova et al., 2025).

6.2. Ekonomik Katma Değer ve Tekno-Ekonomik Yaklaşımlar

Süt yan ürünlerinin değerlendirilmesi, işletmeler açısından yalnızca çevresel değil aynı zamanda ekonomik avantajlar da sağlamaktadır. Geleneksel sistemlerde atık olarak değerlendirilen peynir altı suyu; protein konsantresi, fermente ürün hammaddesi, prebiyotik bileşen, içecek bileşeni olarak kullanıldığında yeni ekonomik değer yaratabilmektedir (Czarniecka-Skubina et al., 2025). Özellikle WPC ve WPI gibi yüksek protein içerikli ürünlerin üretimi, süt işletmeleri için yan ürünlerden gelir elde etme fırsatı sunmaktadır. Bununla birlikte endüstriyel ölçekte upcycling uygulamalarının yaygınlaşmasında membran sistemlerinin yatırım maliyetleri, enerji tüketimi, ürün standardizasyonu, lojistik ve depolama koşulları gibi bazı ekonomik faktörler önemlidir: Bu nedenle küçük ve orta ölçekli işletmelerde, yan ürünlerin yerel ölçekte değerlendirilmesine yönelik daha basit teknolojilerin

geliştirilmesi önem taşımaktadır (Pires et al., 2021; Soumati et al., 2023).

6.3. Döngüsel Ekonomi ve Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri

Süt yan ürünlerinin fonksiyonel gıdalara dönüştürülmesi, Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları ile uyumlu bir yaklaşım sunmaktadır (Dadhaneeya et al., 2024). Bu uygulamalar özellikle;

SDG 2 – Açlığa Son: Gıda kaynaklarının daha verimli kullanılması ve besin kayıplarının azaltılması,

SDG 12 – Sorumlu Üretim ve Tüketim: Kaynakların yeniden değerlendirilmesi ve atık oluşumunun azaltılması,

SDG 13 – İklim Eylemi: Üretim süreçlerinin çevresel etkilerinin azaltılması hedefleriyle ilişkilidir (Idrishi et al., 2022; Rakesh ve Mahendran, 2024).

Bu nedenle süt yan ürünlerinin değerlendirilmesi, yalnızca atık yönetimi stratejisi değil; sürdürülebilir gıda sistemlerine geçiş için önemli bir üretim modeli olarak görülmektedir.

7. ZORLUKLAR VE GELECEK PERSPEKTİFLER

Süt yan ürünlerinin fonksiyonel gıda üretiminde kullanımı önemli avantajlar sağlamakla birlikte, teknolojik, ekonomik ve tüketici kabulü açısından bazı sınırlamalar içermektedir.

7.1. Duyusal Özellikler ve Tüketici Kabulü

Peynir altı suyu bazlı ürünlerin geliştirilmesinde en önemli zorluklardan biri duyusal özelliklerin iyileştirilmesidir.

Peynir altı suyunun kendine özgü; hafif ekşi tat, düşük yoğunluklu yapı ve karakteristik aroma özellikleri bazı tüketiciler tarafından olumsuz algılanabilmektedir (Arora & Mali, 2025). Özellikle protein hidroliz ürünlerinde oluşabilen hidrofobik peptitler, acılık gelişimine neden olabilmektedir. Bu durum protein hidrolizatlarının kullanımını sınırlayan önemli faktörlerden biridir. Bu nedenle aroma maskeleyme, uygun fermantasyon stratejileri ve bileşen kombinasyonları ürün kabulünü artırmak amacıyla kullanılmaktadır (Czarniecka-Skubina et al., 2025).

7.2. Mikrobiyolojik Güvenlik

Peynir altı suyu, yüksek su aktivitesi ve besin içeriği nedeniyle mikroorganizmaların gelişimi için uygun bir ortamdır. Bu nedenle depolama, taşıma ve işleme aşamalarında mikrobiyolojik kontrol büyük önem taşımaktadır. Özellikle uygun olmayan koşullarda patojen mikroorganizmaların gelişme riski bulunabilmektedir. Bu nedenle; hızlı soğutma, uygun pastörizasyon, hijyenik üretim uygulamaları fonksiyonel ürün güvenliği açısından gereklidir (Yadav et al., 2015).

7.3. Tüketici Algısı ve Pazarlama Yaklaşımları

Upcycled gıda ürünlerinin yaygınlaşmasındaki önemli engellerden biri tüketici algısıdır. Tüketiciler sürdürülebilirlik kavramına olumlu yaklaşırsa da “atık” veya “artık ürün” ifadeleri bazı durumlarda olumsuz çağrışımlara neden olabilmektedir. Bu nedenle iletişim stratejilerinde ürünlerin atıktan üretildiği vurgusu yerine kaynak verimliliği, sürdürülebilir üretim, besinsel değer ve fonksiyonel özellikler ön plana çıkarılmalıdır (Aschemann-Witzel et al., 2023).

7.4. Standardizasyon ve Mevzuat

Süt yan ürünlerinin bileşimi; hayvan beslenmesi, süt kalitesi, üretim teknolojisi ve mevsimsel değişimler gibi birçok

faktörden etkilenebilmektedir. Bu durum fonksiyonel bileşenlerin standardizasyonunu zorlaştırmaktadır. Ayrıca fonksiyonel gıdalarda sağlık beyanları ve probiyotik iddiaları birçok ülkede sıkı düzenlemelere tabidir. Bu nedenle bilimsel kanıtların güçlendirilmesi ve standardize analiz yöntemlerinin geliştirilmesi gerekmektedir (Tunick et al., 2025; Taşkoparan et al., 2025).

8. SONUÇ

Süt endüstrisi, yüksek üretim hacmi nedeniyle önemli miktarda yan ürün oluşturan gıda sektörlerinden biridir. Özellikle peynir üretimi sırasında ortaya çıkan peynir altı suyu, ikinci peynir altı suyu ve diğer süt serum fraksiyonları; geçmişte çoğunlukla atık olarak değerlendirilmiş ve yüksek organik yükleri nedeniyle çevresel problemlere neden olmuştur (Pires et al., 2021). Bununla birlikte, günümüzde sürdürülebilir üretim anlayışının gelişmesiyle birlikte bu yan ürünler, yalnızca bertaraf edilmesi gereken materyaller olarak değil; proteinler, laktoz, mineraller, biyoaktif peptitler ve fonksiyonel bileşenler açısından değerli kaynaklar olarak değerlendirilmeye başlanmıştır (Mirzakulova et al., 2025).

Membran filtrasyon, enzimatik hidroliz, fermentasyon ve yenilikçi proses teknolojileri sayesinde süt yan ürünlerinden; peynir altı suyu protein konsantreleri, biyoaktif peptitler, prebiyotik bileşenler, fermente içecekler ve fonksiyonel gıda bileşenleri elde edilebilmektedir. Bu yaklaşımlar, süt endüstrisinde atık miktarının azaltılmasına katkı sağlarken aynı zamanda yeni ürün geliştirme fırsatları sunmaktadır. Özellikle upcycling yaklaşımı, gıda sistemlerinde kaynak kullanımını optimize eden ve döngüsel ekonomi prensipleriyle uyumlu bir model olarak önem kazanmaktadır. Süt yan ürünlerinin fonksiyonel gıda üretiminde değerlendirilmesi; çevresel

sürdürülebilirliğin artırılması, doğal kaynak kullanımının azaltılması ve ekonomik değer yaratılması açısından önemli avantajlar sağlamaktadır. Bununla birlikte, bu ürünlerin yaygınlaştırılması için duysal kabul, mikrobiyolojik güvenlik, ekonomik uygulanabilirlik, standardizasyon ve mevzuat gibi konuların birlikte ele alınması gerekmektedir. Gelecekte süt yan ürünlerinin biyoteknolojik yöntemlerle daha etkin şekilde değerlendirilmesi; sürdürülebilir, yenilikçi ve sağlık odaklı gıda sistemlerinin geliştirilmesine önemli katkılar sağlayacaktır (Adesra et al., 2021; Merino et al., 2026).

KAYNAKÇA

- Adesra, A., Srivastava, V. K., & Varjani, S. (2021). Valorization of Dairy Wastes: Integrative Approaches for Value Added Products. *Indian journal of microbiology*, 61(3), 270–278. <https://doi.org/10.1007/s12088-021-00943-5>
- Amjad, A., Jameel, Q. Y., Rasheed, M., Riaz, S., Shankar, A., Khare, N., Shan, K. A., Imran, A., Islam, F., Arshad, M. U., Naeem, U., & Ndagire, C. T. (2026). Cheese waste upcycling: Sustainable approaches and value addition in dairy sector: A comprehensive review. *Waste and Biomass Valorization* 17, 1303–1322. <https://doi.org/10.1007/s12649-025-03219-x>
- Arora, S. K., & Mali, Y. (2025). Water-rich whey: An invaluable resource for beverage development toward sustainable dairy. *WATER*, 14, 70. <https://doi.org/10.14294/WATER.2024.4>
- Aschemann-Witzel, J., Asioli, D., Banovic, M., Perito, M. A., & Peschel, A. O. (2023). Consumer understanding of upcycled foods – Exploring consumer-created associations and concept explanations across five countries. *Food Quality and Preference*, 105, 105033. <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2023.105033>
- Bandara, T.A., Munasinghe-Arachchige, S.P., & Gamlath, C.J. (2023). Fermented whey beverages: A review of process fundamentals, recent developments and nutritional potential. *International Journal of Dairy Technology*, 76, 737-757. <https://doi.org/10.1111/1471-0307.12993>
- Bangar, S. P., Chaudhary, V., Kajla, P., Balakrishnan, G., & Phimolsiripol, Y. (2024). Strategies for upcycling food waste in the food production and supply chain. *Trends in*

Food Science & Technology, 143, 104314.
<https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.104314>

Bihola, A., Singh, A. K., Deshwal, G. K., & Sharma, H. (2026). Membrane-based isolation of milk bioactive compounds: Technological advances, nutritional and biological significance. *International Dairy Journal*, 173, 106481.
<https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2025.106481>

Costa, M. A., Schmitz, C., de Lima, J. C., Lehn, D. N., & Volken de Souza, C. F. (2025). Recent perspectives on the biosynthesis of galacto-oligosaccharides: A systematic review and meta-analysis. *Food Chemistry*, 497, 147072.
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2025.147072>

Czarniecka-Skubina, E., Pielak, M., Neffe-Skocińska, K., Kajak-Siemaszko, K., Karp-Paździerska, S., Głuchowski, A., Moczowska-Wyrwisz, M., Rosiak, E., Rutkowska, J., Antoniewska-Krzeska, A., & Zielińska, D. (2025). Whey—A valuable technological resource for the production of new functional products with added health-promoting properties. *Foods*, 14(4258).
<https://doi.org/10.3390/foods14244258>

Dadhaneeya, H., Nema, P.K., & Pawar, K.R. (2024). From waste to wealth: sustainable approaches and novel strategies in the utilisation of food and dairy by-products – a critical review. *International Journal of Food Science & Technology*, 59, 8668-8679.
<https://doi.org/10.1111/ijfs.17479>

El-Aidie, S. A. M., & Khalifa, G. S. A. (2024). Innovative applications of whey protein for sustainable dairy industry: Environmental and technological perspectives- A comprehensive review. *Comprehensive reviews in*

food science and food safety, 23(2), e13319.
<https://doi.org/10.1111/1541-4337.13319>

Fancello, F., Zara, G., Hatami, F., Scano, E. A., & Mannazzu, I. (2024). Unlocking the potential of second cheese whey: A comprehensive review on valorisation strategies. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 23, 411–441. <https://doi.org/10.1007/s11157-024-09687-2>

Fluerasu, D., Negrea, M., Neagu, C., Dossa, S., Jianu, C., Lalescu, D., Berbecea, A., Cseh, L., Cocan, I., Misca, C., Suba, M., Muresan, V., Tanislav, A., & Alexa, E. (2025). Whey valorization in functional jellies: A nutritional and technological approach. *Foods*, 14, 3193. <https://doi.org/10.3390/foods14183193>

France, T. C., Kennedy, E., O'Regan, J., & Goulding, D. A. (2025). Current perspectives on the use of milk fat globule membrane in infant milk formula. *Critical reviews in food science and nutrition*, 65(28), 5534–5549. <https://doi.org/10.1080/10408398.2024.2417791>

Gatto, A., & Chepeliev, M. (2024). Global food loss and waste estimates show increasing nutritional and environmental pressures. *Nature Food*, 5, 136–147. <https://doi.org/10.1038/s43016-023-00915-6>

Güneş, K. (2026). Sustainable management of whey generated from cheese production in the Lake Çıldır Basin and adjacent communities. *Black Sea Journal of Agriculture*, 9(1), 100–104. <https://doi.org/10.47115/bsagriculture.1820007>

Idrishi, R., Aggarwal, D., & Sharma, V. (2022). Upcycling technologies in the food industry. In S. Sehgal, B. Singh, & V. Sharma (Eds.), *Smart and sustainable food*

- technologies* (pp. 367–392). Springer.
https://doi.org/10.1007/978-981-19-1746-2_13
- Jiang, L., Zhang, Z., Qiu, C., & Wen, J. (2024). A Review of Whey Protein-Based Bioactive Delivery Systems: Design, Fabrication, and Application. *Foods*, 13(15), 2453. <https://doi.org/10.3390/foods13152453>
- Kheto, A., Adhikary, U., Dhua, S., Sarkar, A., Kumar, Y., Vashishth, R., Shrestha, B. B., & Saxena, D. C. (2025). A review on advancements in emerging processing of whey protein: Enhancing functional and nutritional properties for functional food applications. *Food Safety and Health*, 3(1), 23–45.
<https://doi.org/10.1002/fsh3.12067>
- Kravtsov, V., Gavrish, A., Anisimov, G., Evdokimov, I. & Lodygin, A., (2026). Recovering water and minerals from dairy waste: Reverse osmosis of whey nanofiltration permeate. *Food and Humanity*, 6, 101113.
<https://doi.org/10.1016/j.foohum.2026.101113>
- Malos, I. G., Ghizdareanu, A.-I., Vidu, L., Matei, C. B., & Pasarin, D. (2025). The Role of Whey in Functional Microorganism Growth and Metabolite Generation: A Biotechnological Perspective. *Foods*, 14(9), 1488.
<https://doi.org/10.3390/foods14091488>
- Meleti, E., Koureas, M., Manouras, A., Giannouli, P., & Malissiova, E. (2025). Bioactive Peptides from Dairy Products: A Systematic Review of Advances, Mechanisms, Benefits, and Functional Potential. *Dairy*, 6(6), 65.
<https://doi.org/10.3390/dairy6060065>
- Merino, L., Teijeiro, M., Castagnini, J. M., Sebastià, A., Martí-Quijal, F. J., & Bucci, P. (2026). Valorization of Food

- Industry By-Products for Sustainable Functional Food Production: Recent Advances and Future Perspectives. *Foods*, 15(12), 2116. <https://doi.org/10.3390/foods15122116>
- Mirzakulova, A., Sarsembaeva, T., Suleimenova, Z., Kowalski, Ł., Gajdzik, B., Wolniak, R., & Bembenek, M. (2025). Whey: Composition, processing, application, and prospects in functional and nutritional beverages—A review. *Foods*, 14, 3245. <https://doi.org/10.3390/foods14183245>
- Mota, J., Moura-Alves, M., Teixeira, A. F., Nóbrega, R., Lameirão, D., & Gonçalves, C. (2026). From Cheese Whey to Functional Ingredients: Upcycling Whey Proteins for Cardiovascular and Immunomodulatory Health—Evidence Mapping and Perspectives from Portugal. *Foods*, 15(5), 908. <https://doi.org/10.3390/foods15050908>
- Mutaliyeva, B., Turkeyeva, E., Madybekova, G., Živković, L., Talluri, V. P., Issayeva, A., & Vinceković, M. (2025). Acid whey valorization: novel approaches for probiotic and functional products development. *Frontiers in Nutrition*, 12, 1630925. <https://doi.org/10.3389/fnut.2025.1630925>
- Neokleous, I., Tarapata, J., & Papademas, P. (2022). Non-thermal Processing Technologies for Dairy Products: Their Effect on Safety and Quality Characteristics. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 6, 856199. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.856199>
- Nie, C., Zhao, Y., Wang, X., Li, Y., Fang, B., Wang, R., Wang, X., Liao, H., Li, G., Wang, P., & Liu, R. (2024). Structure, Biological Functions, Separation, Properties, and Potential Applications of Milk Fat Globule

- Membrane (MFGM): A Review. *Nutrients*, 16(5), 587.
<https://doi.org/10.3390/nu16050587>
- O'Donoghue, L. T., & Murphy, E. G. (2023). Nondairy food applications of whey and milk permeates: Direct and indirect uses. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 22, 2652–2677. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.13157>
- Pan, J., Chen, M., Li, N., Han, R., Yang, Y., Zheng, N., Zhao, S., & Zhang, Y. (2023). Bioactive Functions of Lipids in the Milk Fat Globule Membrane: A Comprehensive Review. *Foods*, 12, 3755. <https://doi.org/10.3390/foods12203755>
- Pires, A. F., Marnotes, N. G., Rubio, O. D., Garcia, A. C., & Pereira, C. D. (2021). Dairy By-Products: A Review on the Valorization of Whey and Second Cheese Whey. *Foods*, 10(5), 1067. <https://doi.org/10.3390/foods10051067>
- Rakesh, B., & Mahendran, R. (2024). Upcycling of food waste and food loss – A sustainable approach in the food sector. *Trends in Food Science & Technology*, 143, 104274. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.104274>
- Rathnakumar, K., Jain, S., Awasti, N., Vashisht, P., Thorakkattu, P., Ramesh, B., Balakrishnan, G., Sajith Babu, K., Ramniwas, S., Rustagi, S., & Pandiselvam, R. (2024). Ultrasonic processing: effects on the physicochemical and microbiological aspects of dairy products. *Critical reviews in biotechnology*, 44(8), 1638–1652. <https://doi.org/10.1080/07388551.2024.2332941>
- Rodrigues, M. H. P., Gräff, C. A., Tupuna-Yerovi, D. S., Schmitz, C., de Lima, J. C., Timmers, L. F. S. M., Lehn,

- D. N., & Volken de Souza, C. F. (2024). The bioactive potential of cheese whey peptides from different animal origins (bovine, goat, sheep, buffalo, and camel): A systematic review and meta-analysis. *Food Research International*, 196, 115053. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2024.115053>
- Saadi, S., Makhoulouf, C., Nacer, N. E., Halima, B., Faiza, A., Kahina, H., Wahiba, F., Afaf, K., Rabah, K., & Saoudi, Z. (2024). Whey proteins as multifunctional food materials: Recent advancements in hydrolysis, separation, and peptidomimetic approaches. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 23, e13288. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.13288>
- Salminen, S., Collado, M. C., Endo, A., Hill, C., Lebeer, S., Quigley, E. M. M., Sanders, M. E., Shamir, R., Swann, J. R., Szajewska, H., & Vinderola, G. (2021). The International Scientific Association of Probiotics and Prebiotics (ISAPP) consensus statement on the definition and scope of postbiotics. *Nature reviews. Gastroenterology & hepatology*, 18(9), 649–667. <https://doi.org/10.1038/s41575-021-00440-6>
- Sciuto, G., Russo, N., Randazzo, C. L., & Caggia, C. (2025). Valorization of Second Cheese Whey Through Microalgae-Based Treatments: Advantages, Limits, and Opportunities. *BioTech*, 14(4), 79. <https://doi.org/10.3390/biotech14040079>
- da Silva, R.C., Colleran, H.L., & Ibrahim, S.A. (2021). Milk fat globule membrane in infant nutrition: a dairy industry perspective. *Journal of Dairy Research*. 88(1), 105-116. <https://doi.org/10.1017/S0022029921000224>

- Soumati, B., Atmani, M., Benabderrahmane, A. & Benjelloun, M. (2023). Whey Valorization –Innovative Strategies for Sustainable Development and Value-Added Product Creation. *Journal of Ecological Engineering*, 24(10), 86–104. <https://doi.org/10.12911/22998993/169505>
- Taşkoparan, Ş., Altınay, C., Özer, H.B. (2025). Recent updates of probiotic dairy-based beverages. *Food & Function*. 16(5), 1656–1669. <https://doi.org/10.1039/d4fo06322h>
- Tit, M. A., Moga, V.-M., Constantinescu, M. A., Băţuşaru, C. M., & Tit, O. (2024). Harnessing the potential of whey in the creation of innovative food products: Contributions to the circular economy. *Recycling*, 9(79). <https://doi.org/10.3390/recycling9050079>
- Tunick, M. H., Renye, J. A., Jr., & Garcia, R. A. (2025). Conversion of whey and other dairy waste into antimicrobial and immunoregulatory compounds by fermentation. *Frontiers in Food Science and Technology*, 5, 1542284. <https://doi.org/10.3389/frfst.2025.1542284>
- Udourioh, G. A., Solomon, M. M., & Okolie, J. A. (2025). A Review of the Valorization of Dairy Industry Wastes through Thermochemical, Biological, and Integrated Processes for Value-Added Products. *Food science of animal resources*, 45(2), 375–408. <https://doi.org/10.5851/kosfa.2025.e2>
- Vashisht, P., Singh, L., Mahanta, S., Verma, D., Sharma, S., Saini, G.S., Sharma, A., Chowdhury, B., Awasti, N., Mahanta, S., & Chauhan, D.S. (2024). Pulsed electric field processing in the dairy sector: A review of applications, quality impact and implementation challenges. *International Journal of Food Science & Technology*, 59(4), 2122–2135. <https://doi.org/10.1111/ijfs.16979>

- Vinderola, G., Sanders, M. E., & Salminen, S. (2022). The Concept of Postbiotics. *Foods*, 11(8), 1077. <https://doi.org/10.3390/foods11081077>
- Waseem, M., Javed, M. R., Ali, K., Saleem, M., Manzoor, M. F., Farhan, M., Mugabi, R., Sharma, A., & Nayik, G. A. (2024). Microwave-sonication synergistic extraction of dairy waste proteins: A review of green approach for dairy waste proteins valorization. *Ultrasonics Sonochemistry*, 111, 107111. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2024.107111>
- Yadav, J. S. S., Yan, S., Pilli, S., Kumar, L., Tyagi, R. D., & Surampalli, R. Y. (2015). Cheese whey: A potential resource to transform into bioprotein, functional/nutritional protein and bioactive peptides. *Bioresource Technology*, 33, 6, 756-774. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2015.07.002>
- Zaky, A. A., Simal-Gandara, J., Eun, J.-B., Shim, J.-H., & Abd El-Aty, A. M. (2022). Bioactivities, applications, safety, and health benefits of bioactive peptides from food and by-products: A review. *Frontiers in Nutrition*, 8, 815640. <https://doi.org/10.3389/fnut.2021.815640>
- Zeng, X., Wang, Y., Yang, S., Liu, Y., Li, X., & Liu, D. (2023). The functionalities and applications of whey/whey protein in fermented foods: a review. *Food science and biotechnology*, 33(4), 769–790. <https://doi.org/10.1007/s10068-023-01460-5>

EDIBLE BIODEGRADABLE FILMS AND COATINGS, ACTIVE FOOD PACKAGING SYSTEMS, THEIR CURRENT APPLICATIONS AND FUTURE OUTLOOK

Burcu GÖKKAYA ERDEM¹

1. INTRODUCTION

In this section, the importance of packaging, the disadvantages of synthetic and non-biodegradable packaging technologies, the need for biodegradable packaging, types of edible films and coatings and their production methods, as well as active packaging components (particularly antioxidant and antimicrobial packaging) and their application areas, are evaluated together.

1.1. Historical Evolution of Food Packaging, Comparison of Synthetic and Biobased Packaging

Food packaging technology plays a vital role in protecting food against physical, chemical, and biological external factors and in ensuring consumer acceptability and safety throughout the supply chain (Oksuztepe and Beyazgul, 2015). In the early stages of human history, people did not lead a sedentary lifestyle and relied on food they could hunt or gather in their immediate surroundings for consumption. Consequently, there was no need for packaging technology during this nomadic era (Risch, 2009). However, over time, early human societies

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Gaziantep Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Gıda Mühendisliği, ORCID: 0000-0002-4112-5729.

began transitioning into settled agricultural communities. This shift significantly increased the need for storage and transportation methods to preserve produced food for extended periods.

In the early stages of human existence—when humanity shifted from foraging to production, thereby creating a need for storage—the primary materials used for the simple containers developed were readily available natural substances such as leaves, tree bark, and wood (Risch, 2009). These rudimentary storage containers marked the beginning of early human efforts and served as a stepping stone for future developments. With the Industrial Revolution, a significant process of advancement, transformation, and evolution began in the field of food packaging, driven by the impact of advanced, innovative manufacturing techniques and functional materials. Metal cans, one of the first packaging materials produced for commercial purposes, effectively preserved the product's aroma and moisture and were originally manufactured for snuff (Risch, 2009). Shortly after this invention, these tin cans were adapted for food preservation as part of the "canning technique" discovered by the scientist Nicolas Appert. Progress in this area was accelerated by Emperor Napoleon Bonaparte's directive to extend the shelf life of existing food stocks, as access to fresh food was nearly impossible for French soldiers during wartime (Risch, 2009). Initially, Nicolas Appert used glass bottles sealed with cork stoppers and wire; however, the highly fragile nature of glass posed significant challenges during transport and handling. This issue was resolved through the commercialization of metal cans, which offered high impact resistance and facilitated the heat treatment process essential for canning (Risch, 2009). Paperboard began to be used for the manufacture of folding boxes in the early 1800s; this was followed by the introduction of corrugated cardboard boxes—

now the industry standard for shipping packaging—during the 19th century (Altuntas, 2014). Although vinyl chloride and cellulose nitrate were discovered in the 1800s, their active use in food packaging did not occur until the 19th century (Oksuztepe and Beyazgul, 2015). Low-density polyethylene (LDPE)—first produced by Imperial Chemical Industries in the first half of the 1900s and still widely used today—has become one of the primary packaging materials, alongside high-density polyethylene (HDPE) (Altuntas, 2014). Petrochemical-based synthetic plastics (such as polyester, polyamide, and polyolefin derivatives) enjoy great popularity due to their low production costs, ease of supply, and excellent mechanical and barrier properties which are key parameters for packaging materials (Tharanathan and Saroja, 2001). However, despite these advantages, synthetic plastics are virtually non-degradable, thereby significantly contributing to environmental pollution and high carbon emissions (Shlush and Davidovich-Pinhas, 2022). Furthermore, it is known that these non-degradable plastics can cause the migration of toxic chemicals from the packaging material into the food product, posing a threat to human health (Altuntas, 2014). This critical situation has driven a significant paradigm shift toward researching renewable, biodegradable, and compostable biopolymers as sustainable alternatives (Tan et al., 2021). Edible films and coatings represent a highly promising innovation particularly in the being of primary packaging for reshaping food preservation methods into sustainable and eco-friendly practices. Derived from agricultural, marine, and/or food-based by-products, these biodegradable films and coatings are inherently eco-friendly, biodegradable, and compatible with the environment (Tharanathan and Saroja, 2001). While edible films are pre-formed from natural biopolymer components into sheets separate from the food, edible coatings are defined as thin layers formed directly onto the surface of the food product (Krochta,

2002). Upon degradation, these biodegradable packaging materials have the potential to function as soil fertilizer and organic soil amendments, thereby completing the agricultural waste cycle (Tharanathan and Saroja, 2001). Beyond their ecological benefits, edible films and coatings reduce gas and moisture permeability, limit moisture loss, delay lipid oxidation, and enhance the visual appeal of food products by providing a glossier, smoother surface (Chillo et al., 2008). In fact, the application of edible barrier-type coatings is not an entirely new invention; it is an ancient method with roots stretching back to early times. For instance, in the early 12th century, Chinese farmers coated citrus fruits with natural wax to minimize water loss from the fruit's surface (Guilbert, 1986). By the 15th century, Yuba—a traditional Asian edible film—was widely used to wrap delicate food products and protect them from adverse external factors (Gennadios et al., 1993). In the 16th century, coating meat with animal fat to prevent moisture loss had become standard practice (Hassan et al., 2018). Furthermore, during the 19th century, nut kernels and almonds began to be coated with sucrose to prevent oxidative deterioration and rancidity during storage (Gennadios et al., 1993). In the 1930s, oil-in-water emulsions were formulated to enhance the gloss of freshly harvested fruit, slow down ripening rates, and delay moisture loss (Debeaufort et al., 1998). Over the past century, research aimed at optimizing the barrier, mechanical, and active protective properties of these biodegradable coatings has increased in both scientific and industrial production settings. For an edible film or coating formulation to be industrially successful, the packaging product must serve both as a food ingredient and as a protective packaging material. These criteria can be briefly summarized as follows: 1) acceptable sensory properties aligned with consumer expectations; 2) good barrier properties against gas permeation and moisture migration, combined with sufficient mechanical

resistance to withstand handling conditions; 3) complete safety for human consumption (non-toxicity, use of food-grade additives, and the absolute absence of hazardous chemical residues); 4) uncomplicated, scalable, and low-cost application technologies; 5) biodegradability and environmental friendliness; and 6) low production and raw material costs (Debeaufort et al., 1998).

1.2. Classification of Edible Films and Coatings by Raw Materials

The production of edible films and coatings is achieved by dissolving film-forming biopolymers in suitable solvents such as water, ethanol, or acetic acid (Bourtoom, 2008). These film-forming biopolymer raw materials are generally classified into four main categories based on their chemical structures: proteins, polysaccharides, lipids, and composites (Bourtoom, 2008). Each material class within these four main groups possesses unique physical, chemical, mechanical, and barrier advantages, alongside specific structural limitations.

1.2.1. Protein-Based Edible Films and Coatings

Proteins used in the development of biodegradable food packaging can be derived from animal sources (such as casein, whey protein concentrate/isolate, collagen, gelatin, and egg albumin) or plant sources (such as corn zein, soy protein, wheat gluten, cottonseed, peanut, and rice protein) (Hassan et al., 2018). Structurally, proteins exist in two main forms: fibrous proteins (structural proteins that form animal tissues and are insoluble in water) and globular proteins (water-soluble proteins that can dissolve in aqueous acids, bases, or salts) (Stellwagen, 1994). To form edible films, proteins must be denatured—using acids, bases, solvents, or heat treatment—to transform them into their primary structures consisting of extended polymer chains (Stellwagen, 1994). Following denaturation, these chains

interact and form bonds with one another through hydrogen, ionic, and/or covalent bonds (Hassan et al., 2018). The molecular network resulting from the bonds formed between these robust molecules imparts high mechanical strength and superior gas barrier properties to protein-based films. Consequently, edible films act as highly effective barriers against oxygen, nitrogen, carbon dioxide, and aroma compounds, even under conditions of low relative humidity (Hassan et al., 2018; Liu et al., 2024). Protein molecules possess a highly hydrophilic nature. Consequently, protein-based films tend to rapidly absorb ambient moisture due to their hydrophilic nature, resulting in poor water vapor barrier properties. However, this drawback can be mitigated by leveraging the synergistic effects achieved through the combined use of different bio-based materials (Lisitsyn et al., 2021). Animal-derived proteins, such as casein and whey, are widely preferred for dairy-based packaging due to their nutritional value, ready availability, water solubility, and excellent emulsifying capacities (Bourtoom, 2008).

1.2.2. Polysaccharide-Based Films and Coatings

Starch, alginate, cellulose esters, chitosan, carrageenan, pectin, and plant gums are polysaccharide-based biodegradable polymers widely used in the production of edible films (Zhao et al., 2021). These compounds are generally effective in imparting properties such as hardness, brittleness, thickness, toughness, viscosity, and gel-forming ability to the formulation (Fagundes et al., 2015). Exhibiting selective gas permeability, these polysaccharide-based films can create a desirable modified atmosphere (MAP) environment that extends the shelf life of fresh produce without inducing the anaerobic conditions that could lead to the proliferation of microorganisms thriving in oxygen-free environments (Fagundes et al., 2015). Their generally colorless and oil-free nature—and consequent low

caloric content—are among other reasons why polysaccharide-based films are preferred. They are commonly applied to fruits, vegetables, shellfish, and meats to reduce surface water loss, enzymatic browning, and oxidative rancidity (Fagundes et al., 2015). Despite these favorable mechanical, structural, and nutritional properties, their highly hydrophilic nature results in high water vapor permeability and poor barrier performance (Zhao et al., 2021). Chitosan, a polysaccharide derived from chitin found in seafood processing waste, is of great importance due to its inherent bioactive properties (antimicrobial and antioxidant activities) (Singh et al., 2022).

1.2.3. Lipid-Based Films and Coatings

Hydrophobic compounds—such as natural waxes (beeswax, carnauba wax, candelilla wax), certain resins, essential oils, and surfactant emulsifiers, alongside oils of plant and animal origin—are utilized in the formation of lipid-based films and coatings (Amin et al., 2021). The fundamental characteristic and advantage of lipid-based polymers stem largely from their hydrophobic nature (Amin et al., 2021). Lipids possess tightly packed crystalline structures; these structures inhibit the passage of water vapor molecules, thereby facilitating the formation of highly effective moisture barriers that preserve the moisture content of foods and minimize weight loss during storage (Amin et al., 2021). Furthermore, lipids enhance the visual appeal of food products by imparting surface gloss and integrity to the packaged item (Amin et al., 2021). Despite these undeniable benefits, lipids cannot form a cohesive, edible layer when used alone, as they lack the repeating molecular units linked by covalent bonds (Amin et al., 2021). Due to their high lipid content, lipid-based films are highly susceptible to oxidation and rancidity; additionally, they exhibit very low gas permeability at high temperatures, a condition that can lead to anaerobic respiration issues in fresh fruits and

vegetables (Amin et al., 2021). Lipid-based films possess low mechanical strength and a brittle structure; moreover, due to structural differences, they adhere poorly to hydrophilic food surfaces (Amin et al., 2021). Consequently, lipids are rarely used in alone; They are generally preferred for use in combination with proteins or polysaccharides to form composite films (Amin et al., 2021).

1.2.4. Composite Films and Coatings

Biodegradable composite packaging—intended for edible film and coating technologies—consists of heterogeneous structures created by combining two or more types of biopolymer materials to simultaneously enhance mechanical and barrier properties (Galus, 2018). In these formulations, a hydrocolloid (protein or polysaccharide) forms a supporting structural matrix that provides selective resistance to oxygen and carbon dioxide, while the lipid component creates resistance against water vapor transmission (Galus, 2018). The water vapor barrier property of composite films depends on the ratio of hydrophilic to hydrophobic components, as transmission occurs almost entirely through the hydrophilic phase (Debeaufort and Voilley, 1995). Composite coatings are applied as either bilayer (laminated) or single-phase (emulsion) systems (Debeaufort and Voilley, 1995). The mechanical and barrier properties of emulsion-based films depend on the compatibility of the components used and the droplet size (Debeaufort and Voilley, 1995). Studies indicate that adding olive oil to chitosan-based films significantly increases elongation at break—due to the hydrophobic nature of the oil—while simultaneously reducing moisture absorption and water vapor permeability (Pereda et al., 2012).

1.3. Film and Coating Formation Technologies

There are various application methods for edible films and coatings. The most common of these methods are described below:

- Standalone Film Formation Methods

1.3.1. Solvent Casting Method

Due to its ease of application, low cost, and use of low processing temperatures, this method is one of the most widely used techniques in both laboratory applications and pilot-scale edible film production (Rhim et al., 2006). The casting process consists of three main stages: 1) preparation of the film-forming solution, in which the biopolymer is completely dissolved in a suitable solvent (such as water, ethanol, or a water-alcohol mixture); 2) the casting process, where the prepared film-forming solution is poured onto predetermined plates or flat molds; and 3) the drying process, in which the solvent is evaporated to form an integral polymer film adhering to the casting plate (Rhim et al., 2006; Jensen et al., 2015). Selecting the appropriate type of biopolymer is a critical step in obtaining successful and effective biodegradable coating formulations (Jensen et al., 2015). For instance, while water is used to dissolve whey protein isolate, an acetic acid-water mixture is used to disperse chitosan (Jensen et al., 2015). The casting process relies largely on polymer solubility rather than thermal melting (Jensen et al., 2015). Sufficient drying time is required for the evaporation of the solvent used; this duration can be shortened compared to standard methods by using specialized microwave, vacuum, or tray type dryers (Cha et al., 2003). The drying stage is vital for strengthening the intramolecular interactions and bonds between polymer chains, thereby achieving a smooth, homogeneous surface (Velaga et al., 2018). However, excessively rapid drying to save time can adversely

affect the physical and microstructural properties of the film, leading to surface cracks, wrinkles, or structural heterogeneity (Velaga et al., 2018).

1.3.2. Extrusion Method

Extrusion is a thermoplastic based film production method widely used for commercial and industrial-scale manufacturing (Hernandez-Izquierdo and Krochta, 2008). This dry process aims to enhance the overall performance of biopolymers by modifying their physicochemical properties (Fitch-Vargas et al., 2016). The extrusion utilizes the thermoplastic behavior of biopolymers and relies on heating a formulation containing a plasticizer above its glass transition temperature under low-moisture conditions (Ribeiro et al., 2021). The extrusion process can be described as consisting of three main functional zones: 1) the feed zone, where raw material is pushed forward via compression; 2) the kneading zone, where high pressure (170–350 bar) and high shear forces are applied to melt the components and ensure homogenization; and 3) the heating and die zone, where the molten polymer is extruded through a shaping die (Calderon-Castro et al., 2018). Key parameters affecting product quality in this method include the moisture content of the feed, extruder screw speed, applied die pressure, and barrel temperature (Westlake et al., 2023). Extrusion offers advantages such as high efficiency, the absence of solvents, shorter processing times, and lower energy consumption; these characteristics can make the method commercially superior, despite high initial equipment and maintenance costs (Westlake et al., 2023).

1.3.3. Electrospinning (ES)

Electrospinning (ES) is a non-mechanical technology that has advanced in recent years. This method utilizes a high electric field to produce continuous micro- or nano-diameter

fibers from biopolymer solutions at room temperature and atmospheric pressure (Chawla et al., 2021). Nanofiber products obtained via electrospinning exhibit high porosity and a very high surface-area-to-volume ratio (Chawla et al., 2021). This method offers tunable morphology and high encapsulation efficiency; it stands out as an alternative approach—particularly for incorporating heat-sensitive bioactive compounds, such as essential oils and peptides, into the structure without the risk of thermal degradation (Chawla et al., 2021). Electrospun systems are also widely used in the design of active packaging with antioxidant and antimicrobial properties (Karami et al., 2021).

- Coating Application Methods:

1.3.4. Dipping Method

The dipping method involves immersing the food product to be coated directly into a liquid coating solution, ensuring the solution adheres to the food surface, and subsequently removing excess material (Suhag et al., 2020). The coated food product can be dried under ambient conditions or by using specialized forced-air dryers to facilitate solvent evaporation and coating solidification (Suhag et al., 2020). Dipping is a simple, low-cost method widely used at both laboratory and industrial scales for coating fresh produce, whole meat cuts, and fish, as it ensures the complete coating of irregularly shaped food items (i.e., those lacking a defined, uniform geometric shape).

1.3.5. Spraying Method

This method is preferred when a uniform yet thin coating layer is required, or when the coating is intended to be applied to a specific area of the product rather than the entire surface (Suhag et al., 2020). In the spraying method, the coating solution is atomized into micro-droplets and distributed evenly across the food surface; high-pressure spray applicators or air-

blowing systems are utilized for this purpose (Suhag et al., 2020). Spraying is among the recommended methods—particularly for fresh fruits and vegetables—because it creates thin, controlled barrier layers without affecting sensory properties.

1.3.6. Dripping Method

In the principle of the dripping method, the liquid coating material is applied to the product as droplets falling from above at a controlled rate; subsequently, the food product is passed through brush assemblies rotating at a constant speed (Poverenov et al., 2014). The purpose of using brushes is to spread the coating liquid evenly across the product's surface. Excess liquid is removed via evaporation using fans (Poverenov et al., 2014). This spreading process, carried out using brushes, facilitates precise control over coating thickness—a critical parameter—since excessive or insufficient coating thickness can lead to cracking, loss of adhesion, or structural deterioration during storage (Poverenov et al., 2014).

1.3.7. Brushing (Spreading) Method

The brushing method involves the manual or mechanical application of a liquid coating solution onto the food product to be coated using a brush (Poverenov et al., 2014). This method encompasses the processes of spreading the solution over the product surface followed by a drying stage (Valdes et al., 2017). The efficiency of the spreading process depends on variables such as substrate surface roughness, ambient temperature, relative humidity, surface tension, and liquid density (Valdes et al., 2017). Fluid viscosity plays a crucial role as it determines the liquid's resistance to spreading; spreading high-viscosity solutions can be significantly more challenging than spreading low-viscosity formulations (Valdes et al., 2017).

1.4. Active Packaging: Antimicrobial and Antioxidant Systems

In active packaging, the environment is actively modified during the product's storage period through continuous interaction among three components: the food, the packaging material, and the atmosphere within the package headspace (Han, 2003). Unlike traditional, passive packaging—which functions primarily to provide protection against physical factors—active packaging dynamically manages the storage process of the packaged food to extend shelf life, maintain food quality, and enhance microbiological safety (Han, 2003; Suppakul et al., 2003). Active systems can essentially be classified into two main categories: systems that remove unwanted compounds—such as oxygen, carbon dioxide, excess moisture, or ethylene—from the packaging environment (scavenging/absorption systems), and systems that release active, beneficial compounds—such as carbon dioxide, ethanol, antioxidants, or antimicrobials—into the package headspace or onto the food surface (Quintavalla and Vicini, 2002). Active packaging technology is attracting significant interest due to growing consumer demand for safe food products that are natural, additive-free, minimally processed, and possess a long shelf life (Han, 2003).

1.4.1. Antimicrobial Packaging Systems

The function of antimicrobial packaging is to kill, inhibit, or minimize the growth rates of target pathogens and/or spoilage-causing microorganisms, as well as to extend the microbial lag phase (the period of adaptation to the environment prior to active growth) (Han, 2000). To achieve these goals and ensure maximum protective efficacy, antimicrobial agents can be incorporated into the macromolecular structure of edible films. These agents may be added directly to food formulations

or placed in the packaging headspace in the form of active sachets or separate layers (Han, 2000). Conventional commercial active systems utilize various gases to control microbial growth; for instance, carbon dioxide is used in modified atmosphere packaging (MAP) to suppress microbial proliferation, while sulfur dioxide is used for fresh fruits and ethanol vapor for confectionery products (Smith et al., 1990). Although methods such as vacuum packaging (an oxygen-free environment) and oxygen scavengers control aerobic microbial growth, they also carry the risk of triggering anaerobic microbial growth; this makes the control of anaerobic pathogens a critical issue regarding product safety (Han, 2003b). The efficacy of antimicrobial films largely depends on direct contact with the food surface, as this contact facilitates the migration of active agents from the polymer matrix into the food (Appendini and Hotchkiss, 2002). Substances with antimicrobial properties are generally classified into three main groups: chemical agents, natural substances, and probiotics. It is essential that chemical antimicrobials intended for direct contact with food possess the characteristics of food-grade additives (Malhotra et al., 2015).

When non-food-grade chemicals are used, it is essential to immobilize them within the packaging polymer to prevent their migration into the food; this process requires a rigorous verification procedure to ensure absolutely no free chemical residues remain in the food system (Malhotra et al., 2015). Due to their well-understood mechanisms of action and low cost, organic acids (sorbic, benzoic, lactic, citric, propionic, and succinic acids) are among the most widely used chemical agents (Han and Floros, 1997). Organic acids exhibit characteristic activity against microorganisms; for instance, the antimicrobial agent sorbic acid is an exceptional antifungal but is less effective against bacteria (Han and Floros, 1997). The combined use of multiple organic acids can often provide a broader

spectrum of antimicrobial activity and a stronger synergistic effect compared to the use of a single acid (Han and Floros, 1997). Chemical agents include fungicides such as imazalil—used in wax coatings for citrus fruits—and certain food sanitizing agents that are permitted to leave only trace residues on food-contact surfaces (Malhotra et al., 2015). Some examples of natural antimicrobial agents include plant extracts, plant or spice essential oils, enzymes, and bacteriocins. These have become highly popular due to strong consumer demand for foods free from chemical preservatives (Malhotra et al., 2015). Plant and spice extracts—such as those from grape seeds, grapefruit seeds, garlic, and cloves—contain numerous active components that provide a broad spectrum of antimicrobial activity and valuable antioxidant properties (Burt, 2004). However, alongside these beneficial attributes, they possess certain disadvantages, including low chemical stability and the tendency to impart undesirable pungent odors and flavors to the food products in which they are used (Burt, 2004).

Certain enzymes, such as lysozyme, effectively degrade bacterial cell walls; however, they are highly sensitive to pH and temperature, and their efficacy against Gram-negative bacteria is generally quite limited due to the complex outer lipopolysaccharide membranes of these organisms (Malhotra et al., 2015). Conversely, they exhibit high degradative activity against the peptidoglycan layer of Gram-positive bacteria (Malhotra et al., 2015). Bacteriocins such as nisin, pediocin, lacticin, and propionin are low-molecular-weight peptides with antimicrobial properties produced by bacteria (Daeschel, 1989). Nisin is widely used in food packaging; however, its stability and release rates must be carefully optimized, taking into account factors such as heat treatment and pH levels (Daeschel, 1989; Malhotra et al., 2015). Probiotics such as *Lactobacillus reuteri* can be intentionally incorporated into packaging

systems or fermented foods to suppress pathogenic microorganisms like *E. coli* O157:H7 (Muthukumarasamy et al., 2003). Lactic acid bacteria (LAB) are capable of producing bacteriocins and non-peptide inhibitors such as reuterin that establish a competitive microflora and inhibit spoilage-causing bacteria (Muthukumarasamy et al., 2003).

1.4.2. Antioxidant Packaging Films

Antioxidant packaging films represent a significant innovation in food preservation, offering advantages such as environmental friendliness, low cost, and the ability to incorporate natural bioactive compounds into the system (Karimi Sani et al., 2025). The presence of oxygen and free radicals accelerates food spoilage by triggering lipid peroxidation, protein degradation, nutrient loss, and enzymatic browning (Wu et al., 2024). These oxidative reactions adversely affect flavor, texture, color, and nutritional value, rapidly causing rancidity in high-fat foods, dairy products, and meats (Wu et al., 2024; Zhao et al., 2025). Antioxidant packaging films mitigate these negative effects by scavenging free radicals and limiting exposure to oxygen (Wu et al., 2024). Natural antioxidants (essential oils, polyphenols, flavonoids, plant extracts, and pigments) are highly preferred over their synthetic counterparts due to their low toxicity, high safety profile, and consumer acceptance (Chang et al., 2023). When integrated into packaging biopolymers, these bioactive substances extend shelf life by actively releasing antioxidants to protect the food (Vasile and Baican, 2021). Common analytical methods used to measure antioxidant activity include DPPH scavenging, ABTS scavenging, ferric reducing antioxidant power (FRAP), and total antioxidant capacity assays (El-Shafei et al., 2021). The incorporation of active antioxidant agents into film polymer matrices also yields positive results regarding the physical,

mechanical, barrier, optical, and thermal properties of the resulting active films (Karimi Sani et al., 2025).

- Effects on physical and mechanical properties: Antioxidant components alter molecular interactions within the polymer film matrix. One study revealed that the addition of curcumin to starch-based films increased film thickness (from 0.019 to 0.023 mm) and improved tensile strength—a key mechanical property—by 70%, while simultaneously reducing elongation at break (Mali and Pandey, 2024). In contrast, the incorporation of epicatechin gallate into chitosan films was found to not only increase tensile strength by 40% (from 27.94 to 36.20 MPa) but also raise elongation from 38.36% to 56.40% (Yong et al., 2024). Hydrophobic active ingredients also reduce the water solubility of the film matrix; for instance, date seed extract has been reported to lower the solubility of an alginate-based film from 86.98% to 54.60% (Khwaldia et al., 2023).

- Barrier Properties: In addition to imparting active properties, antioxidant compounds can serve other functions, such as acting as plasticizers or cross-linking agents within the film. Chemical bonds formed between the bioactive component and the film's polymer matrix strengthen structural integrity, thereby enhancing the film's barrier properties. A study by Shi et al. (2025) reported that the addition of a curcumin/beta-cyclodextrin complex to sodium alginate-based films significantly reduced oxygen and water vapor permeability. Furthermore, it has been determined that the addition of zinc oxide nanoparticles, quercetin, and natamycin improves the water vapor barrier properties of cellulose-chitosan-based polysaccharide films by approximately 60% (Sani et al., 2023).

- Optical and Thermal Properties: Many bioactive extracts contain natural pigments that block specific light wavelengths. Literature indicates that inulin treated with

anthocyanins and caffeic acid can provide protection against UV light, thereby helping to prevent light-induced oxidation and browning in packaged foods (Tan et al., 2025; Shahi et al., 2025).

1.5. Food Applications of Active Packaging

Meat products are highly valued due to their rich protein content; however, owing to their high water content and elevated levels of unsaturated fatty acids, they are highly susceptible to both microbial spoilage and lipid oxidation (Alizadeh Sani et al., 2024). Active packaging films serve as effective tools for inhibiting these spoilage mechanisms. For instance, in the packaging of ground meat—a product type characterized by a large surface area and consequently a high risk of spoilage—researchers have reported that cellulose-based active packaging systems containing moringa and grape seed extracts exhibited 50% radical scavenging activity and reduced lipid oxidation (TBARS value) by more than 50% over a 16-day storage period (Barzan et al., 2024). Regarding poultry products, films enriched with *Cassia* seed gum and wintergreen extract have been reported to effectively suppress lipid oxidation in dried chicken meat, reducing TBARS values by half compared to control samples after 9 days of storage (Wei et al., 2024). Dairy products—and cheese in particular—are highly susceptible to mold growth, lipid oxidation, and sensory deterioration (Chawla et al., 2021). A study found that using chitosan films containing nettle extract as slice separators in Havarti cheese delayed lipid oxidation, resulting in a 55% reduction in TBARS values compared to control separators during a 45-day storage period at refrigeration temperature (5°C) (Florez et al., 2023). In another study, films derived from polyvinyl alcohol, *Lepidium sativum* gum, and hyper-branched polyamide amine provided effective protection against lipid oxidation, reduced the formation of harmful trans fats, and

extended the shelf life of Cheddar cheese by up to 4 weeks (Rehim et al., 2023). Key factors contributing to the spoilage of bakery products include moisture loss and rapid mold contamination—caused by *Penicillium* and *Rhizopus* species—following the baking process (Bizymis and Tzia, 2022; Klinmalai et al., 2021). Bioactive films can effectively control moisture migration and, consequently, fungal growth. Research indicates that white bread slices packaged in soy protein isolate films—activated using lecithin as an emulsifying agent and black cumin oil nanoemulsions—showed no mold growth during a storage period of approximately two weeks, whereas spoilage was observed by the sixth day in standard low-density polyethylene packaging (Hosseiniyeh et al., 2024). It has been reported that coating whole-wheat bread loaves with a zein-based coating solution containing sunflower oil—applied via brushing or spraying—significantly slows moisture migration from the crumb to the crust, thereby reducing starch retrogradation during storage (Mouzakitis et al., 2022). Fresh and especially sliced fruit and vegetable products have a short shelf life due to high respiration rates, the potential for enzymatic browning, moisture loss, and rapid microbial spoilage (Xie et al., 2025). A study observed that applying a bioactive medlar seed starch-based coating to fresh strawberries preserved the fruit's ascorbic acid and total phenolic content while maintaining its structural properties and color for 16 days at refrigeration temperatures (Costa et al., 2023). Liquid oils and nut products with high fat content are highly susceptible to rancidity and secondary lipid oxidation (Jakubowska et al., 2023). Packaging peanut butter products with biodegradable starch films containing 3% propyl gallate successfully reduced lipid oxidation through the controlled release of the substance and proved effective in keeping peroxide values below critical limits during a 10-month storage period (Gao et al., 2024). Packaging olive oil in active chitosan- and gelatin-based sachets

containing gallic acid minimized the accumulation of volatile oxidation products (Kurek et al., 2024).

1.6. Pitfalls, Regulations, and Future Outlook

One of the fundamental challenges facing active food packaging technology is the successful adaptation of promising laboratory results to real-world commercial applications (Malhotra et al., 2015). Standard laboratory analyses are often conducted using food simulants—such as pure water or simple agar media—that possess much simpler compositions compared to actual food products (Malhotra et al., 2015). In contrast, real food systems exhibit characteristics such as higher salt concentrations, lipids, proteins, fluctuating pH levels, and lower water activity, all of which can interact with and deactivate active antimicrobial or antioxidant compounds (Walters et al., 2003; Grower et al., 2005; Mauriello et al., 2005). Furthermore, ambient storage temperature and humidity during transportation can significantly influence the release rates of active compounds (Szente and Szejtli, 2004; Buonocore et al., 2003). Many active films suffer from an "initial burst effect," where active agents are released all at once and rapidly depleted, thereby allowing surviving microbes to proliferate (Chi-Zhang et al., 2004). Research indicates that essential oils must be used at much higher concentrations to achieve antimicrobial effects in real food matrices comparable to those observed in laboratory cultures (Burt, 2004). These high concentrations, however, ...leading to serious organoleptic issues—such as intense and unpleasant herbal odors, sharp tastes, and textural changes—that cause consumers to reject the product (Burt, 2004; Tongnuanchan et al., 2012).

Active packaging systems are subject to strict regulations regarding food contact safety (fmicb-06-00611.pdf). Although many essential oils and natural extracts hold GRAS ("Generally

Recognized As Safe") status in the USA, certain constituents are prohibited or restricted due to cytotoxic or allergenic risks (Burt, 2004). For instance, monoterpenes with active properties—such as thymol, carvacrol, and eugenol—exhibit cellular toxicity and can cause irritation to human oral tissues through cell membrane lysis (Burt, 2004). If active compounds—such as non-food-grade fungicides—are incorporated into the system, they must be chemically immobilized within the film's polymer matrix to prevent migration into the food (Malhotra et al., 2015). Furthermore, it is essential to conduct the necessary checks to verify that zero migration occurs and that no free chemical residues remain in the final product (Malhotra et al., 2015).

The commercial future of active and edible packaging relies on an approach that integrates multiple disciplines, such as food technology, microbiology, biotechnology, polymer chemistry, and materials science (Malhotra et al., 2015). Integrating advanced nanotechnology into edible film technology will enhance the stability of bioactive substances, mask unpleasant sensory characteristics, and enable stimulus-responsive, precise, and controlled release (Karimi Sani et al., 2025). Optimizing cost-effective production methods and clarifying international safety regulations will position active packaging as a key technology for reducing food waste and ensuring food safety on a global scale.

REFERENCES

- Alizadeh Sani, M., Zhang, W., Abedini, A., et al. (2024). Intelligent packaging systems for the quality and safety monitoring of meat products: from lab scale to industrialization. *Food Control*, 160, 110359.
- Amin, U., Khan, M.U., Majeed, Y., et al. (2021). Potentials of polysaccharides, lipids and proteins in biodegradable food packaging applications. *International Journal of Biological Macromolecules*, 183, 2184-2198.
- Appendini, P., and Hotchkiss, J. H. (2002). Review of antimicrobial food packaging. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 3, 113-126.
- Barzan, G., Sacco, A., Giovannozzi, A. M., et al. (2024). Development of innovative antioxidant food packaging systems based on natural extracts from food industry waste and *Moringa oleifera* leaves. *Food Chemistry*, 432, 137088.
- Bourtoom, T. (2008). Edible films and coatings: characteristics and properties. *International Food Research Journal*, 15(3), 237-248.
- Buonocore, G. G., Del Nobile, M. A., Panizza, A., et al. (2003). A general approach to describe the antimicrobial agent release from highly swellable films intended for food packaging applications. *Journal of Controlled Release*, 90, 97-107.
- Burt, S. (2004). Essential oils: their antibacterial properties and potential applications in foods—a review. *International Journal of Food Microbiology*, 94, 223-253.
- Calderon-Castro, A., et al. (2018). Effect of extrusion parameters on chemical and structural properties of starch-based films. *Food Hydrocolloids*, 79, 120-130.

- Chang, B. P., Trinh, B. M., Tadele, D. T., and Mekonnen, T. H. (2023). Natural antioxidant and antimicrobial agents and processing technologies for the design of active food packaging polymers. *Polymer Reviews*, 63(4), 961-1013.
- Chawla, R., Sivakumar, S., and Kaur, H. (2021). Antimicrobial edible films in food packaging: current scenario and recent nanotechnological advancements-a review. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, 2, 100024.
- Chi-Zhang, Y. D., Yam, K. L., and Chikindas, M. L. (2004). Effective control of *Listeria monocytogenes* by combination of nisin formulated and slowly released into a broth system. *International Journal of Food Microbiology*, 90, 15-22.
- Chillo, S., Flores, S., Mastromatteo, M., et al. (2008). Influence of glycerol and chitosan on the physical properties of tapioca starch-based edible films. *Journal of Food Engineering*, 88, 159-168.
- Costa, B. P., Carpine, D., Ikeda, M., et al. (2023). Bioactive coatings from non-conventional loquat (*Eriobotrya japonica* Lindl.) seed starch to extend strawberries shelf-life: an antioxidant packaging. *Progress in Organic Coatings*, 175, 107320.
- Debeaufort, F., Quezada-Gallo, J. A., and Voilley, A. (1998). Edible films and coatings: a review. *Food Technology*, 40, 47-59.
- Debeaufort, F., and Voilley, A. (1995). Effect of surfactants and drying conditions on water vapor permeability of emulsified methylcellulose-lipid films. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 43, 2243-2247.

- Fan, X., Zhang, B., Zhang, X., et al. (2023). Incorporating *Portulaca oleracea* extract endows the chitosan-starch film with antioxidant capacity for chilled meat preservation. *Food Chemistry*: X, 18, 100662.
- Florez, M., Vazquez, M., and Cazon, P. (2023). Enhancing the quality of havarti cheese: Chitosan films with nettle *Urtica dioica* L. extract as slice separators to retard lipid oxidation. *LWT - Food Science and Technology*, 189, 115504.
- Galus, S. (2018). Functional properties of composite edible films based on soy protein isolate and gelatin. *Food Hydrocolloids*, 77, 110-121.
- Gao, S., Li, M., Zhai, X., et al. (2024). Starch as a smart, cheap, and green gatekeeper for the controlled release of propyl gallate from antioxidant biodegradable packaging films. *Food Chemistry*, 453, 139627.
- Grower, J. L., Cooksey, K., and Getty, K. (2005). Release of nisin from methylcellulose-hydroxypropyl methylcellulose film formed on low-density polyethylene film. *Journal of Food Science*, 69, 107-111.
- Han, J. H. (2000). Antimicrobial food packaging. *Food Technology*, 54, 56-65.
- Han, J. H. (2003). "Antimicrobial food packaging," in *Novel Food Packaging Techniques*, ed. R. Ahvenainen (Cambridge: Woodhead Publishing), 50-70.
- Han, J. H., and Floros, J. D. (1997). Casting antimicrobial packaging films and measuring their physical properties and antimicrobial activity. *Journal of Plastic Film and Sheeting*, 13, 287-298.
- Hosseiniyeh, N., Mohtarami, F., Almasi, H., and Azizi, S. (2024). Soy protein isolate film activated by black seed

oil nanoemulsion as a novel packaging for shelf-life extension of bulk bread. *Food Science & Nutrition*, 12(3), 1706-1723.

Jakubowska, E., Gierszewska, M., Szydlowska-Czerniak, A., et al. (2023). Development and characterization of active packaging films based on chitosan, plasticizer, and quercetin for rapeseed oil storage. *Food Chemistry*, 399, 133934.

Karimi Sani, I., Hassani, B., Rasul, N. H., et al. (2025). Antioxidant packaging films: application for sustainable food protection. *Current Research in Food Science*, 11, 101222.

Klinmalai, P., Srisa, A., Laorenza, Y., et al. (2021). Antifungal and plasticization effects of carvacrol in biodegradable poly (lactic acid) and poly (butylene adipate terephthalate) blend films for bakery packaging. *LWT - Food Science and Technology*, 152, 112356.

Kurek, M., Descours, E., Poldan, P., et al. (2024). Possibility of storing olive oil in antioxidant biobased pouches made of chitosan and gelatin. *Food Hydrocolloids*, 151, 109835.

Malhotra, B., Keshwani, A., and Kharkwal, H. (2015). Antimicrobial food packaging: potential and pitfalls. *Frontiers in Microbiology*, 6, 611.

Mouzakitis, C.-K., Sereti, V., Matsakidou, A., et al. (2022). Physicochemical properties of zein-based edible films and coatings for extending wheat bread shelf life. *Food Hydrocolloids*, 132, 107856.

Oksuztepe, G., and Beyazgul, M. (2015). History and development of food packaging systems. *Journal of Food Health and Technology*, 4(2), 85-94.

- Poverenov, E., Danino, S., Horev, B., et al. (2014). Layer-by-layer electrostatic deposition of biodegradable coatings on fresh-cut melons. *Food Chemistry*, 153, 111-118.
- Risch, S. J. (2009). Food packaging history and innovations. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 57(18), 8089-8092.
- Suhag, R., Kumar, N., Petkoska, A. T., et al. (2020). Film formation and deposition methods of edible coating on food products: A review. *Food Research International*, 136, 109582.
- Suppakul, P., Miltz, J., Sonneveld, K., and Bigger, S. W. (2003). Active packaging technologies with an emphasis on antimicrobial packaging and its applications. *Journal of Food Science*, 68, 408-420.
- Tharanathan, R. N., and Saroja, S. (2001). Biodegradable packaging - an environmental necessity. *Journal of Scientific and Industrial Research*, 60, 547-559.
- Velaga, S. P., et al. (2018). Drying parameters and their influence on biopolymeric film microstructure. *Journal of Pharmaceutical Sciences*, 107(1), 112-120.
- Wei, N., Pan, Z., Ning, Y., et al. (2024). Cassia seed gum films incorporated with partridge tea extract as an edible antioxidant food packaging film for preservation of chicken jerky. *Polymers*, 16(8), 1086.

KIRMIZI PANCAR TURŞU SULARININ FİZİKO-KİMYASAL ÖZELLİKLERİ VE *LACTOBACILLUS* SPP. POPÜLASYONUNUN PROBİYOTİK POTANSİYEL AÇISINDAN DEĞERLENDİRİLMESİ

Tülay DURAN¹

Hüseyin DURAN²

1. GİRİŞ

Gıdaların muhafazasında köklü bir geçmişe sahip olan fermentasyon; faydalı mikroorganizmaların metabolik faaliyetleri ve enzimatik reaksiyonlar aracılığıyla yürütülen geleneksel bir koruma tekniğidir. Kendiliğinden (doğal) gelişebileceği gibi starter kültürler vasıtasıyla da başlatılabilen bu biyolojik proses; ürünlerin raf ömrünü uzatma, besleyici değerini yükseltme, lezzet ve doku gibi duyuşsal niteliklerini geliştirme ve insan sağlığı üzerinde olumlu etkiler sağlama gibi pek çok üstünlük sunmaktadır (Mudoor vd., 2023; Zapašnik vd., 2022). Özellikle Asya, Doğu Avrupa ve Afrika coğrafyalarında yaygın olarak yararlanılan laktik asit fermentasyonu; sebze, meyve, süt ürünleri, balık ve hatta mantar gibi çeşitli ham maddelerin muhafaza edilmesinde ve turşu, kimchi, lahana turşusu (sauerkraut) ile fermente zeytin gibi karakteristik gıdaların eldesinde sıklıkla uygulanmaktadır (Manowan vd., 2020; Avila & Darmasiwi, 2025).

¹ Öğr. Gör. Dr., Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Pamukova Meslek Yüksekokulu, Gıda İşleme Bölümü, ORCID: 0000-0001-6061-5347.

² Öğr. Gör. Dr., Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Pamukova Meslek Yüksekokulu, Gıda İşleme Bölümü, ORCID: 0000-0002-8098-8607.

Geleneksel gıda işleme tekniklerinin başında gelen laktik asit fermentasyonu, meyve ve sebzelerin muhafazasında binlerce yıllık köklü bir geçmişe sahiptir. Bu biyolojik yöntemin en karakteristik biçimde uygulandığı ürün gruplarının başında ise turşu gelmektedir. Turşu, genel tanımı itibarıyla sebze ve meyvelerin belirli oranlarda tuz barındıran salamurada veya kendi hücresel sularında, laktik asit bakterilerinin gerçekleştirdiği fermentasyonla ya da ortama doğrudan laktik asit katılmasıyla elde edilen; asitlik ve tuzun ortak koruyucu etkisi sayesinde dayanıklılık kazandırılmış bir gıdadır. Dolayısıyla turşu imalatında sürecin başarısını belirleyen iki ana bileşenin laktik asit fermentasyonu ve ortamdaki tuz varlığı olduğu söylenebilir. Fermentasyon evresinde, ham maddenin doğal mikrobiyotasında bulunan laktik asit bakterileri ortamdaki şekerleri organik asitlere dönüştürerek süreci başlatır. Laktik asit fermentasyonunun bir diğer kritik işlevi; mikrobiyal bozulmalara ve toksin oluşumuna yol açan organizmalara karşı koruma sağlaması, zararlı patojenlerin üremesini sınırlandırması ve ürünün besleyici değerini artırmasıdır. Proses esnasında salamuraya eklenen tuz ise konsantrasyonuna bağlı olarak gelişecek mikrobiyal popülasyonun türünü ve yoğunluğunu yönlendirirken, pektinolitik ve proteolitik parçalanmaları dizginleyerek dokunun aşırı yumuşamasını engeller ve ürün kalitesini korur (Tokatlı vd., 2012).

Turşunun kalitesi ve sürecin başarısı; salamura bileşimi, çevresel koşullar ve hammaddeye başlangıç mikrobiyal yükü gibi karmaşık faktörlere bağlıdır. Laktik asit bakterilerinin (LAB) gelişimini desteklemek ve istenmeyen florayı baskılamak için yeterli tuz, uygun sıcaklık ve anaerobik ortam sağlanmalıdır. Geleneksel üretimdeki doğal fermentasyonda mikrobiyota zamanla değişir ve süreç 4 temel evrede gerçekleşir:

1. **Başlangıç Evresi:** Hammaddenin salamuraya girmesiyle (pH ~5.5) mayalar ile Gram (+/-) bakteriler çoğalır; ortamdaki glikoz ve früktoz LAB için besin sağlar.
2. **Birincil Fermantasyon Evresi:** pH'nın düşmesiyle LAB ortama hakim olur. *Streptococcus faecalis*, *Leuconostoc mesenteroides*, *Pediococcus pentosaceus*, *Lactobacillus brevis* ve *Lactobacillus plantarum* şeker tükenene veya asit engeline kadar üremeyi sürdürür.
3. **İkincil Fermantasyon Evresi:** Asit toleransı yüksek olan *Lactobacillus plantarum* gibi türler ortamda baskın kalmaya devam ederek asit üretimini ve fermantasyonu tamamlar.
4. **Fermantasyon Sonrası Evre:** Şekerlerin tükenmesi ve yüksek asitlik sonucu mikrobiyal aktivite durur; ürün kararlı (stabil) yapıya kavuşur (Tokatlı vd., 2012).

Ülkemizde lahanalar, salatalık, havuç, biber, şalgam, patlıcan ve fasulye gibi pek çok farklı sebzedeki geleneksel olarak çeşitli turşular yapılmaktadır (Çetin, 2011; İrkin & Songun, 2012). Laktik asit fermantasyonunun uygulandığı bu zengin sebze çeşitliliği arasında kırmızı pancar da; yüksek besin değeri, biyoaktif bileşenleri ve kendine özgü duyu nitelikleriyle öne çıkan son derece değerli ham maddelerden birini oluşturmaktadır.

Dünyanın pek çok bölgesinde yaygın biçimde kültürü yapılan ve yumrusu tüketilen kırmızı pancar (*Beta vulgaris* L.); mutfaktaki geniş kullanım imkanları, yüksek besleyici değeri ve sağlığı destekleyici nitelikleriyle giderek daha fazla öne çıkmaktadır (Ceclu, 2021). Kırmızı pancar, *Amaranthaceae* (*Chenopodiaceae*) familyasından, Akdeniz kökenli ve M.Ö. 1000'li yıllardan beri yetiştirilen iki yıllık otsu bir kök sebzidir (Ninfali ve Angelino, 2013; Kezi ve Sumathy, 2014). Dünya genelinde yıllık üretimi 269 milyon tonu aşan pancar (FAOSTAT, 2022); diyet lifi, B6/C vitaminleri, potasyum, demir

ve magnezyum gibi mineraller açısından son derece zengindir (Srivastava ve Singh, 2016; Mwaijibe ve Vicent, 2025). Kök sebzeler arasında en yüksek inorganik nitrat oranına (~1379 mg/kg) sahip olmasıyla kardiyovasküler ve solunum sağlığını desteklemekte (dos S. Baiao vd., 2020); yapısındaki fenolik maddeler, flavonoidler ve betalain pigmentleri (betasiyanin/betaksantin) sayesinde güçlü antioksidan, antikanser ve antienflamatuar koruma sağlamaktadır (Ceclu, 2021; El-Sohaimy vd., 2020; Stoica vd., 2025).

Gıda ve Tarım Örgütü (FAO), küresel düzeyde artış gösteren kardiyovasküler rahatsızlıkların önlenmesinde meyve-sebze tüketiminin kritik önemini vurgulamaktadır (FAO,2024). Yüksek verimli ve yetiştiriciliği kolay bir sebze olan pancardaki fenolik bileşiklerin sağlık üzerindeki olumlu etkileri ise doğrudan biyolojik erişilebilirliklerine bağlıdır (Akan vd.,2021; Cai vd.,2006; Huang vd.,2023; Chen vd.,2020; Domínguez-Avila vd.,2021;Tomas vd.,2020; Velderrain-Rodriguez vd., 2016). Laktik asit bakterileri ve mayalarla gerçekleştirilen fermentasyon işlemleri, gıdaların muhafazasını sağlarken bağlı fenolik bileşikleri serbest hale getirerek toplam fenolik içerik (TPC) ve antioksidan kapasitede belirgin bir artış sunmaktadır (Domínguez-Avila vd.,2021; Tomas vd.,2020; Velderrain-Rodriguez vd., 2016; Leonard vd., 2021; de Wolf vd., 2025).

Bu bilgiler ışığında yürütülen çalışmada; farklı tuz konsantrasyonlarının kırmızı pancar turşu suyunun fermentasyon süreci ve kalitesi üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla, farklı tuz oranlarında hazırlanan kırmızı pancar turşu sularının pH, tuz, kurumadde, kül, % laktik asit miktarları ile *Lactobacillus* spp. canlı hücre sayılarının tespiti ve analizi gerçekleştirilmiştir.

2. MATERYAL VE METOD

2.1. Turşu Suyu Üretimi

Kırmızı pancarlar yerel bir pazardan alınıp yıkanıp soyulmuş ve Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Pamukova Meslek Yükseokulu'ndaki inkübasyon odasında 28 °C'de 20 gün fermentasyona tabi tutulmuştur. Turşular süzölmüş ve turşu suları analizler için kullanılmıştır. Turşu suyu kodlarının ne ifade ettiği Tablo1'de gösterilmiştir.

Tablo1. Kırmızı pancar suları ve kodları

Üretilen kırmızı pancar turşu sularının	Turşu kodları
%0 tuz + probiyotik	TS 1
%1 tuz + probiyotik	TS 2
%2 tuz + probiyotik	TS 3
%0 tuz + doğal	TS 4
%1 tuz + doğal	TS 5
%2 tuz + doğal	TS 6
%0 tuz + %0,4 asetik asit + doğal	TS 7
%1 tuz + %0,4 asetik asit + doğal	TS 8
%2 tuz + %0,4 asetik asit + doğal	TS 9
%0 tuz + %0,4 asetik asit + probiyotik	TS 10
%1 tuz + %0,4 asetik asit + probiyotik	TS 11
%2 tuz + %0,4 asetik asit + probiyotik	TS 12

2.2. Fizikokimyasal Analizler

Örneklerin nem içeriği, pH değeri, toplam asitlik ve tuz miktarı, Cemeroğlu (2010) tarafından belirtilen yöntemler esas alınarak belirlenmiştir. Toplam asitlik tayini potansiyometrik titrasyon yöntemiyle gerçekleştirilmiş ve toplam asitlik değeri laktik asit cinsinden g/100 g olarak hesaplanmıştır. Örneklerin kül miktarı, Şahin ve Sönmez (2024) tarafından bildirilen yöntem esas alınarak belirlenmiştir. Analizler üç tekerrürlü yapılmış, değerler ortalama $\pm$ standart sapma şeklinde verilmiştir.

2.3. *Lactobacillus* spp. Sayımı

Steril koşullar altında, her bir turşu suyu örneğinden 10 mL alınarak 90 mL %0,85 (w/v) steril NaCl çözeltisine aktarılmış

ve örnekler 1 dakika süreyle karıştırılmıştır. Elde edilen karışımlardan 10^{-1} – 10^{-9} aralığında seri dilüsyonlar hazırlanmıştır. (Harrigan, 1998; Villalobos vd., 2019). Turşu suyu örneklerinde laktik asit bakterilerinin sayımı, Janiszewska-Turak vd. (2021a) tarafından kullanılan yöntem esas alınarak gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, hazırlanan seri dilüsyonlardan MRS (de Man, Rogosa and Sharpe) agar besiyerine yayma plak yöntemiyle üç paralelli ekim yapılmıştır. Ekilen plaklar 30 °C’de 48–72 saat süreyle inkübe edilmiştir. İnkübasyon sonunda gelişen karakteristik koloniler sayılmış ve laktik asit bakterilerinin sayısı log kob/mL olarak hesaplanmıştır.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Fizikokimyasal Özellikler

Turşu sularının pH, titrasyon Asitliği (%Laktik asit), Kurumadde

(%), Kül (%), Tuz(%) analizlerinin sonuçları Tablo 2 ’de verilmiştir.

Tablo 2. Kırmızı pancar turşu sularının fizikokimyasal analiz sonuçları

Turşu Suları	PH	Titrasyon Asitliği (%Laktik asit)	Kurumadde (%)	Kül (%)	Tuz (%)
TS 1	3,53±0,004	1,14±0,012	3,11±0,06	0,29±0,03	0,32±0,06
TS 2	3,40±0,002	1,21±0,014	3,14±0,05	0,48±0,09	0,88±0,05
TS 3	3,38±0,005	0,74±0,008	2,83±0,05	0,99±0,50	1,28±0,08
TS 4	3,59±0,007	1,08±0,008	2,87±0,10	0,32±0,11	0,35±0,01
TS 5	3,23±0,001	1,05±0,005	3,73±0,17	0,46±0,07	0,80±0,03
TS 6	3,41±0,001	0,80±0,008	3,97±0,20	0,93±0,11	1,47±0,02
TS 7	3,56±0,024	1,10±0,019	2,39±0,04	0,25±0,01	0,34±0,03
TS 8	3,43±0,005	0,95±0,005	4,03±0,08	0,52±0,25	0,88±0,03
TS 9	3,40±0,002	1,22±0,029	3,66±0,01	0,86±0,04	1,38±0,08
TS 10	3,39±0,022	1,06±0,012	3,63±0,04	0,29±0,05	0,32±0,03
TS 11	3,39±0,016	1,26±0,009	3,84±0,03	0,59±0,07	0,88±0,03
TS 12	3,33±0,08	0,91±0,009	3,47±0,05	0,92±0,03	1,40±0,07

Kırmızı pancar turşu sularının pH değerlerinin 3,23–3,59 arasında değiştiği görülmektedir. En düşük pH değeri TS 5 (T5) örneğinde $3,23 \pm 0,001$, en yüksek pH değeri ise TS 4 (T4) örneğinde $3,59 \pm 0,007$ olarak belirlenmiştir. Genel olarak örneklerin pH değerlerinin birbirine yakın olduğu ve tüm örneklerde asidik karakterin belirgin olduğu görülmektedir. Benzer şekilde kırmızı pancar turşularının üretildiği bir çalışmada 11 günlük kırmızı pancar salamurası örneklerinin pH değerleri 3,32 ila 3,51 seviyesinde olduğu belirlenmiştir (Janiszewska-Turak vd, 2024).

Titrasyon asitliği değerleri %0,74–1,26 laktik asit arasında değişmiştir. En yüksek titrasyon asitliği TS 11 (T11) örneğinde ($\%1,26 \pm 0,009$), en düşük değer ise TS 3 (T3) örneğinde ($\%0,74 \pm 0,008$) belirlenmiştir. Bununla birlikte pH ile titrasyon asitliği arasında doğrudan ve doğrusal bir ilişki bulunmadığı görülmektedir. Nitekim TS 11 en yüksek titrasyon asitliğine sahip olmasına rağmen en düşük pH değerine sahip örnek değildir. Bu durum, pH'ın yalnızca serbest hidrojen iyonu konsantrasyonunu, titrasyon asitliğinin ise örnekte bulunan toplam titre edilebilir asitleri yansıtmaya açıklandığıdır.

Ayrıca tüm turşularda 3,23–3,59 arasındaki PH değerleri mikrobiyolojik açıdan güvenli asidik bölgede yer aldığı ve titrasyon asitliğinin (%0,74 - %1,26 L.A.) ortamda laktik asit fermentasyonunun başarıyla gerçekleştiğini kanıtladığı görülmüştür.

Kurumadde değerleri %2,39–4,03 arasında değişmiştir. En düşük kurumadde miktarı TS 7 (T7) örneğinde $\%2,39 \pm 0,04$ olarak belirlenirken, en yüksek değer TS 8 (T8) örneğinde $\%4,03 \pm 0,08$ olarak bulunmuştur. Tuz ve asetik asit uygulamalarının yanı sıra kullanılan kültür tipinin kurumadde değerleri üzerinde farklı düzeylerde etkili olmuş olabileceği düşünülmektedir.

Kül değerleri incelendiğinde, örneklerin %0,25–0,99 arasında değişen değerlere sahip olduğu görülmektedir. En düşük kül miktarı TS 7'de (%0,25±0,01), en yüksek kül miktarı ise TS 3'te (%0,99±0,50) belirlenmiştir. Özellikle tuz ilavesinin artmasıyla birlikte genel olarak kül değerlerinde artış eğilimi dikkat çekmektedir.

Örneklerin tuz değerleri ise %0,32–1,47 arasında değişmiştir. Beklendiği üzere başlangıçta ilave edilen tuz miktarındaki artış genel olarak turşu sularının tuz değerlerinde artışa neden olmuştur. En düşük tuz değeri TS 1, TS 7 ve TS 10 örneklerinde yaklaşık %0,32–0,34 düzeyinde bulunurken, en yüksek değer TS 6 örneğinde %1,47±0,02 olarak belirlenmiştir. Bu sonuç, formülasyonda kullanılan tuz miktarının turşu suyunun mineral madde ve özellikle tuz içeriği üzerinde belirgin bir etkisinin olduğunu göstermektedir.

Tuz, su aktivitesini düşürerek patojen ve bozulmaya neden olan mikroorganizmaların gelişimini engeller. Mikroorganizmalar düşük konsantrasyonlardaki tuzu faaliyetleri için kullanırken, yüksek tuz konsantrasyonları plazmolize ve hücre ölümüne neden olur (Bautista-Gallego vd., 2013; Joshi vd., 2015). Janiszewska-Turak vd. (2021), %2 tuz içeren salamurada fermente edilen pancarlarda 7,62 log CFU/mL LAB değeri bildirmiştir. Benzer şekilde, fermente biberlerde %2–6 tuz konsantrasyonlarında LAB gelişimi gözlenirken, %8 tuz kullanımının LAB varlığını önemli ölçüde azalttığı belirlenmiştir (Xiong vd., 2024). Bu sonuçlar, tuz konsantrasyonunun LAB gelişimi üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

3.2. *Lactobacillus* spp. Sayımı

Turşu numunelerinin *Lactobacillus* spp. sayısı log kob/mL cinsinden Tablo 3'te gösterilmiştir.

Tablo 3. Kırmızı pancar turşu sularının *Lactobacillus* spp. (log kob/mL) sayıları

Turşu Suları	<i>Lactobacillus</i> spp. (log kob/mL)
TS 1	7,50±0,01
TS 2	6,58±0,02
TS 3	6,30±0,04
TS 4	6,54±0,06
TS 5	7,59±0,08
TS 6	7,82±0,05
TS 7	5,43±0,04
TS 8	7,56±0,07
TS 9	6,75±0,06
TS 10	6,68±0,14
TS 11	7,57±0,02
TS 12	6,53±0,05

Numunelerin *Lactobacillus* spp. yükü 5,43 ile 7,82 log kob/mL arasında değişmekte olup ortalama 6,90 log kob/mL seviyesindedir. Fermente ürünlerin gıda literatüründe probiyotik veya fonksiyonel gıda olarak nitelendirilebilmesi için gereken minimum canlı laktik asit bakterisi eşiği 10^6 kob/mL (6,00 log kob/ml) olarak kabul edilir (Marco vd., 2021). TS 7 numunesi (5,43 log kob/mL) hariç tutulduğunda, geriye kalan 11 numunenin tamamı (%91,6) bu eşik değerinin oldukça üzerinde canlı bakteri popülasyonuna sahiptir.

Özellikle TS 6 (7,82 log), TS 5 (7,59 log), TS 11 (7,57 log), TS 8 (7,56 log) ve TS 1 (7,50 log) numuneleri 7,50 log kob/mL üzerindeki yüksek bakteri yoğunluklarıyla mikrobiyolojik canlılık ve probiyotik potansiyel açısından en zengin grubu oluşturmaktadır. TS 6 örneği (%2 tuz + doğal fermentasyon) tuz konsantrasyonu açısından da %1,47 ile en yüksek tuza sahiptir. Nitekim, Janiszewska-Turak vd. (2024) yaptığı çalışmada fermentasyon ve depolama sırasında bakteriyel gelişim için en uygun tuz konsantrasyonunu %2–3 olarak belirlemiştir.

4. SONUÇ

İncelenen 12 adet turşu suyu numunesine ait tüm fiziko-kimyasal ve mikrobiyolojik parametreler (pH, titrasyon asitliği, kurumadde, kül, tuz ve *Lactobacillus* spp.) birlikte değerlendirildiğinde; ürünlerin düşük pH (3,23 – 3,59) ve yeterli laktik asit içeriği (%0,74 – 1,26) sayesinde gıda güvenliği açısından uygun ve başarılı bir fermantasyon sürecinden geçtiği tespit edilmiştir. İnorganik madde yükünü temsil eden kül (%0,25 – 0,99) ile tuz (%0,32 – 1,47) oranları arasındaki mükemmel korelasyon, tuz girdisinin ürün mineral profilini doğrudan belirlediğini ortaya koymuştur. Mikrobiyolojik açıdan, TS 7 dışındaki tüm numunelerin (%91,6) probiyotik etkinlik eşiği olan 10^6 kob/ml (6,00 log kob/ml) seviyesini aşması, analiz edilen turşu sularının fonksiyonel gıda niteliğini doğrulamaktadır. Özellikle yüksek kurumadde içeriğinin bakteriyel beslenmeyi ve canlılığı desteklemesi neticesinde; TS 5, TS 6, TS 8 ve TS 11 numuneleri hem kimyasal bileşim dengesi hem de 7,50 log kob/ml'yi aşan laktik asit bakterisi yüküyle tüm parametrelerde en yüksek kaliteyi sergileyen örnekler olmuştur. Elde edilen veriler, turşu sularının güçlü birer probiyotik içecek potansiyeline sahip olduğunu ancak piyasadaki ürünlerde standart bir kalite, tat ve fonksiyonellik yakalayabilmek için özellikle başlangıç salamurasındaki tuz ve kurumadde oranlarının standardize edilmesi gerektiğini göstermektedir.

KAYNAKÇA

- Akan, S., Tuna Güneş, N., & Erkan, M. (2021). Red beetroot: Health benefits, production techniques, and quality maintaining for food industry. *Journal of Food Processing and Preservation*, 45(10), 1–14.
- Avila, K. W., & Darmasiwi, S. (2025). Microbiological and chemical profiling of lacto-fermented shimeji mushroom (*Hypsizygus* sp.) pickle juice using *Lactobacillus bulgaricus* as a starter culture.
- Bautista-Gallego, J., Rantsiou, K., Garrido-Fernandez, A., Cocolin, L., & Arroyo-Lopez, F. N. (2013). Salt reduction in vegetable fermentation: Reality or desire? *Journal of Food Science*, 78, R1095–R1100.
- Cai, Y. Z., Sun, M., Xing, J., Luo, Q., & Corke, H. (2006). Structure-radical scavenging activity relationships of phenolic compounds from traditional Chinese medicinal plants. *Life Sciences*, 78(25), 2872–2888.
- Ceclu, L. (2021). Red beetroot: Composition and health effects—A review. *Nutritional Medicine and Diet Care*. <https://doi.org/10.23937/2572-3278.1510043>
- Cemeroğlu, B. (2010). *Gıda analizleri* (2. baskı). Ankara: Gıda Teknolojisi Derneği Yayınları No: 34.
- Chen, J., Yang, J., Ma, L., Li, J., Shahzad, N., & Kim, C. K. (2020). Structure-antioxidant activity relationship of methoxy, phenolic hydroxyl, and carboxylic acid groups of phenolic acids. *Scientific Reports*, 10(1), 1–9.
- Çetin, B. (2011). Production of probiotic mixed pickles (Tursu) and microbiological properties. *African Journal of Biotechnology*, 10(66), 14926–14931.

- de Wolf, R. X. M., Hider, R. N., Breitmeyer, J., & Serventi, L. (2025). Effect of lactic fermentation and matrix on phenolic content, bioaccessibility, and scavenging activity of beetroot beverages. *European Food Research and Technology*, 251(4), 483–492.
- Domínguez-Avila, J. A., Villa-Rodriguez, J. A., Montiel-Herrera, M., Pacheco-Ordaz, R., Roopchand, D. E., Venema, K., & González-Aguilar, G. A. (2021). Phenolic compounds promote diversity of gut microbiota and maintain colonic health. *Digestive Diseases and Sciences*, 66(10), 3270–3289.
- El-Sohaimy, S. A., Abdo, E., Shaltout, O., Abdalla, A., & Zeitoun, A. (2020). Nutritional evaluation of beetroots (*Beta vulgaris* L.) and its potential application in a functional beverage. *Plants*, 9(12), 1–18. <https://doi.org/10.3390/plants9121752>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2022). *FAOSTAT*. Retrieved from <https://www.fao.org/faostat/en/#data/qcl>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2024). *Preparation documents*. Retrieved September 16, 2024, from <https://www.fao.org/about/meetings/icn2/preparations/document-detail/en/c/220374/>
- Harrigan, W. F. (1998). *Laboratory methods in food microbiology* (3rd ed.). London, England: Academic Press Limited.
- Huang, M. T., Ho, C. T., & Lee, C. Y. (2023). Phenolic compounds in food and their effects on health II. *ACS Symposium Series*, 22, 12.

- Irkin, R., & Songun, G. E. (2012). Applications of probiotic bacteria to the vegetable pickle products. *Scientific Reviews and Chemical Communications*, 2(4), 562–567.
- Janiszewska-Turak, E., Hornowska, Ł., Pobiega, K., Gniewosz, M., & Witrowa-Rajchert, D. (2021b). The influence of *Lactobacillus* bacteria type and kind of carrier on the properties of spray-dried microencapsules of fermented beetroot powders. *International Journal of Food Science & Technology*, 56, 2166–2174.
- Janiszewska-Turak, E., Kołakowska, W., Pobiega, K., & Gramza-Michałowska, A. (2021a). Influence of drying type of selected fermented vegetables pomace on the natural colorants and concentration of lactic acid bacteria. *Applied Sciences*, 11(17), 7864.
- Janiszewska-Turak, E., Wierzbicka, A., Rybak, K., Pobiega, K., Synowiec, A., Woźniak, Ł., ... & Gramza-Michałowska, A. (2024). Studying the influence of salt concentrations on betalain and selected physical and chemical properties in the lactic acid fermentation process of red beetroot. *Molecules*, 29(20), 4803.
- Joshi, V., Chauhan, A., Devi, S., & Kumar, V. (2015). Application of response surface methodology in optimization of lactic acid fermentation of radish: Effect of addition of salt, additives and growth stimulators. *Journal of Food Science and Technology*, 52, 4935–4944.
- Kezi, J., & Sumathy, J. H. (2014). Betalain: A boon to the food industry. *Discovery*, 20, 51–58.
- Manowan, K., Wongputtisin, P., Tassanaudom, U., Sassa, D. T., & Chomsri, N. (2020). Quality characteristics of fermented mushroom and vegetable product using a mixed starter of lactic acid bacteria. *Advances in Food*

Science, Sustainable Agriculture and Agroindustrial Engineering, 3(1), 25–31.
<https://doi.org/10.21776/ub.afssaae.2020.003.01.4>

Marco, M. L., Sanders, M. E., Gänzle, M., Arrieta, M. C., Cotter, P. D., De Vuyst, L., Hill, C., Holzapfel, W., Lebeer, S., Marenstein, D., et al. (2021). The International Scientific Association for Probiotics and Prebiotics (ISAPP) consensus statement on fermented foods. *Nature Reviews Gastroenterology & Hepatology*, 18, 196–208.

Mudoor, S. M., Willing, B. P., & Bourrie, B. C. T. (2023). Opportunities and challenges of understanding community assembly in spontaneous food fermentation. *Foods*, 12(3), 1–6.
<https://doi.org/10.3390/foods12030673>

Mwaijibe, S., & Vicent, V. (2025). Effects of pasteurisation and storage conditions on folate retention and microbiological quality of beetroot juice. *Food Chemistry Advances*, 6, 100939.

Ninfali, P., & Angelino, D. (2013). Nutritional and functional potential of *Beta vulgaris* cicla and rubra. *Fitoterapia*, 89, 88–199.

Sahin, Z., & Sönmez, F. (2024). Comparison of physical, chemical and sensory analyzes of tarhana containing black carrot extract and classical tarhana. *Turkish Journal of Food and Agriculture Sciences*, 6(1), 63–71.

Srivastava, S., & Singh, K. (2016). Changes occur on nutritional value of beetroot (*Beta vulgaris*) after pickling. *Current Research in Nutrition and Food Science*, 4(3), 217–221.
<https://doi.org/10.12944/CRNFSJ.4.3.08>

Stoica, F., Râpeanu, G., Rațu, R. N., Stănciuc, N., Croitoru, C., Țopa, D., & Jitoreanu, G. (2025). Red beetroot and its by-

products: A comprehensive review of phytochemicals, extraction methods, health benefits, and applications. *Agriculture*, 15(3), 270.

Tokatlı, M., Dursun, D., Arslankoz, N., Şanlıbaba, P., & Özçelik, F. (2012). Turşu üretiminde laktik asit bakterilerinin önemi. *Akademik Gıda*, 10(1), 70–76.

Tomas, M., Rocchetti, G., Ghisoni, S., Giuberti, G., Capanoglu, E., & Lucini, L. (2020). Effect of different soluble dietary fibres on the phenolic profile of blackberry puree subjected to *in vitro* gastrointestinal digestion and large intestine fermentation. *Food Research International*, 130, 108954. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.108954>

Velderrain-Rodriguez, G., Quiros-Sauceda, A., Mercado-Mercado, G., Ayala-Zavala, J. F., Astiazaran-Garcia, H., Garobles-Sanchez, R. M., & Gonzalez-Aguilar, G. A. (2016). Effect of dietary fiber on the bioaccessibility of phenolic compounds of mango, papaya and pineapple fruits by an *in vitro* digestion model. *Food Science and Technology*, 36, 188–194.

Villalobos, M. C., Serradilla, M. J., Martín, A., Ruíz-Moyano, S., Casquete, R., Hernández, A., & Córdoba, M. G. (2019). Use of efficient drying methods to improve the safety and quality of dried fig. *Journal of Food Processing and Preservation*, 43(1), e13853.

Xiong, Y., Zhu, C., Wu, B., Wang, T., Yang, L., Guan, J., Yi, Y., Deng, J., & Wu, H. (2024). Effect of different salt additions on the flavor profile of fermented Ciba pepper. *Fermentation*, 10, 111.

Zapaśnik, A., Sokołowska, B., & Bryła, M. (2022). Role of lactic acid bacteria in food preservation and safety. *Foods*, 11(9), 1–17. <https://doi.org/10.3390/foods11091283>

YENİ NESİL GIDA AMBALAJLARI KAVRAMSAL ÇERÇEVE VE SINIFLANDIRMA

Evren ÇAĞLARER¹

1. GİRİŞ

Gıda ambalajı, ürünün üretimden tüketiciye ulaşmasına kadar geçen süreçte fiziksel koruma, muhafaza, taşıma, depolama, bilgilendirme ve pazarlama işlevlerini üstlenen temel bileşenlerden biridir. Gıdanın nem, oksijen, ışık, sıcaklık değişimleri, mekanik hasar, kimyasal bulaşma ve mikroorganizmalardan korunması büyük ölçüde ambalajın özelliklerine bağlıdır. Bu nedenle ambalaj, gıdayı çevresinden ayıran bir bariyer olmanın yanında ürün kalitesinin korunmasını, raf ömrünün uzatılmasını ve gıda kayıplarının azaltılmasını destekleyen bütünlük bir gıda güvenliği aracıdır.

Geleneksel gıda ambalajlarında polietilen, polipropilen, polistiren ve polietilen tereftalat gibi petrokimya kökenli polimerler yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu malzemeler düşük ağırlık, mekanik dayanım, işlenebilirlik, sızdırmazlık ve uygun maliyet gibi önemli avantajlara sahiptir. Ancak fosil kaynaklara bağımlılık, kullanım sonrasında oluşan yüksek atık miktarı, sınırlı geri dönüşüm oranları ve çevrede uzun süre kalabilmeleri, geleneksel plastik ambalajların sürdürülebilirliğiyle ilgili sorunları artırmaktadır.

Geleneksel ambalajların performans avantajları ile çevresel etkileri arasındaki gerilim, gıda ambalajı tasarımında yeni yaklaşımları gerekli kılmaktadır. Yeni sistemlerden daha az

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Kırklareli Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, ORCID: 0000-0002-1343-4751.

kaynak kullanması, kullanım sonundaki çevresel yükünün azaltılması, gıdanın raf ömrünü uzatması, ürünün kalitesi hakkında bilgi üretmesi ve gıda güvenliğini desteklemesi beklenmektedir. Bu beklentiler, ambalaj araştırmalarını alternatif malzeme geliştirme çalışmalarının ötesine taşımış; malzeme bilimi, nanoteknoloji, biyoteknoloji, sensör teknolojileri ve dijital izlenebilirliği bir araya getiren disiplinler arası bir alan oluşturmuştur.

“Yeni nesil gıda ambalajları” tek bir malzeme veya teknoloji sınıfını ifade etmez. Kavram; biyobazlı ve biyobozunur ambalajları, yenilebilir film ve kaplamaları, nanokompozit malzemeleri, aktif ambalaj sistemlerini, akıllı göstergeleri, sensörleri ve dijital izlenebilirlik çözümlerini kapsar. Bu teknolojilerin ortak amacı, gıdanın korunması ile ambalajın çevresel etkilerinin azaltılması arasında daha dengeli bir ilişki kurmaktır. Güncel çalışmalar, söz konusu sistemlerin ayrı ayrı kullanılmasından çok, birden fazla işlevin aynı ambalaj yapısında birleştirilmesine yönelmektedir (Bhargava, Sharanagat, Mor, & Kumar, 2020; Amin et al., 2022).

Biyobazlılık, biyobozunurluk, kompostlanabilirlik, yenilebilir film, nano-destekli yapı, aktif koruma ve akıllı izleme aynı düzeydeki kavramlar değildir. Bunlar ambalajın farklı eksenlerini tanımlar: hammadde kaynağı, kullanım sonu davranışı, malzeme yapısı, koruma mekanizması ve bilgi üretme kapasitesi. Bu nedenle bu bölümde biyobozunur malzeme ailelerinin teknik ayrıntılarına girilmeden, yeni nesil ambalajların sınıflandırılması için gerekli kavramsal ayrımlar öne çıkarılmaktadır (Nilsen-Nygaard et al., 2021; Amin et al., 2022).

Yeni nesil gıda ambalajlarındaki güncel yönelim, biyobozunur malzeme, aktif koruma ve akıllı izleme özelliklerinin aynı sistemde bütünleştirilmesidir. Örneğin polisakkarit temelli bir film nanomalzemelerle güçlendirilebilir,

doğal bir antimikrobiyal madde taşıyabilir ve gıdadaki pH değişimine bağlı olarak renk değiştirebilir. Böyle bir yapı, malzeme performansı, gıdanın korunması ve tüketiciye bilgi sağlama işlevlerini aynı ambalajda birleştirir. Amin et al. (2022) ve Yao et al. (2024), biyobozunur ve polisakkarit temelli sistemlerin aktif ve akıllı özelliklerle bütünleştirilmesini alanın başlıca gelişim yönlerinden biri olarak değerlendirmektedir.

Bununla birlikte tek bir ambalaj teknolojisinin bütün gıda grupları için uygun olması beklenmemelidir. Et ve balık ürünlerinde mikrobiyal gelişme, lipit oksidasyonu ve uçucu amin oluşumu öne çıkarken meyve ve sebzelerde solunum hızı, etilen üretimi ve nem kaybı belirleyicidir. Süt ürünleri ışık ve oksijen etkilerine, yağlar ile kuruyemişler oksidasyona, ekmek ve unlu mamuller ise nem değişimi ve küf gelişimine karşı hassastır. Bu nedenle ambalaj tasarımında malzeme özellikleri ile gıdanın bozulma mekanizması arasında uyum kurulmalı; teknoloji seçimi ürün bileşimi, depolama koşulları, hedef raf ömrü ve dağıtım zinciri dikkate alınarak yapılmalıdır.

Bu bölümün amacı, yeni nesil gıda ambalajlarına ilişkin kavramları ortak bir sınıflandırma çerçevesinde açıklamak; pasif, aktif ve akıllı sistemler arasındaki işlevsel ayrımı ortaya koymaktır.

2. YENİ NESİL GIDA AMBALAJLARININ SINIFLANDIRILMASI

Yeni nesil gıda ambalajlarının sınıflandırılmasında farklı ölçütlerin birbirinden ayrılması gerekir. Literatürde aktif, akıllı, biyobazlı, biyobozunur, kompostlanabilir, yenilebilir, nano-destekli ve sürdürülebilir ambalaj kavramları zaman zaman aynı sınıflandırma düzeyinde kullanılmaktadır. Oysa bu kavramlar ambalajın farklı özelliklerini tanımlar. Pasif, aktif ve akıllı ambalaj ayrımı ambalajın işlevini ve gıda ya da ambalaj ortamıyla

etkileşim biçimini ifade eder. Biyobazlılık malzemenin hammadde kaynağını; biyobozunurluk ve kompostlanabilirlik kullanım sonu davranışını; nano-destekli veya nanokompozit olma durumu ise kullanılan malzemenin boyutunu ve teknolojik niteliğini açıklar.

Bu nedenle yeni nesil bir ambalaj aynı anda birden fazla sınıfa girebilir. Örneğin kitosan esaslı bir film biyobazlı ve biyobozunur olabilir; filme antimikrobiyal bileşen eklendiğinde aktif, pH değişimine duyarlı doğal pigment eklendiğinde akıllı ambalaj özelliği kazanabilir. Aynı film nanoselüloz veya çinko oksit nanoparçacıklarıyla güçlendirildiğinde nano-destekli bir yapı hâline gelir. Dolayısıyla sınıflandırmada ambalajın hangi malzemeden üretildiği, gıdayı nasıl koruduğu, ürünün durumu hakkında bilgi verip vermediği ve kullanım sonrasında nasıl yönetileceği ayrı ayrı değerlendirilmelidir (Soltani Firouz et al., 2021; Amin et al., 2022).

Bu çok eksenli yaklaşım, yeni nesil ambalajların kullanılan malzeme, üstlendiği işlev, gıdayla etkileşim biçimi ve kullanım sonu özellikleriyle birlikte değerlendirilmesini sağlar.

2.1. Pasif Ambalajlar

Pasif ambalajlar, gıda ile dış çevre arasında fiziksel bir engel oluşturan ve koruma işlevini esas olarak bariyer özellikleri aracılığıyla yerine getiren sistemlerdir. Temel görevleri gıdayı çevrelemek, taşınmasını kolaylaştırmak, mekanik hasardan korumak ve nem, oksijen, ışık, aroma bileşenleri, yabancı maddeler ile mikroorganizmaların geçişini sınırlandırmaktır. Cam, metal, kâğıt, karton ve geleneksel plastikler bu amaçla yaygın biçimde kullanılmaktadır.

“Pasif” ifadesi, ambalajın işlevsiz olduğu anlamına gelmez. Pasif ambalajlar, gıdanın raf ömrünün korunmasında temel bariyer görevini yerine getirir. Ayırt edici özellik, ambalajın gıda veya ambalaj atmosferindeki değişimlere yanıt

olarak kasıtlı biçimde madde tutmaması, salmaması ya da ürünün durumu hakkında ölçülebilir bilgi üretmemesidir. Performans; oksijen ve su buharı geçirgenliği, ışık geçirgenliği, mekanik dayanım, ısı kararlılık, sızdırmazlık ve aroma bileşenlerini koruma kapasitesi gibi özelliklerle belirlenir.

Tek bir malzemenin bütün koruma gereksinimlerini karşılayamaması, çok katmanlı ve kompozit yapıların geliştirilmesine yol açmıştır. Bir tabaka mekanik dayanım sağlarken başka bir tabaka oksijen bariyeri, diğer bir tabaka ise ısıyla yapışma özelliği sağlayabilir. Ancak farklı malzemelerin birbirinden ayrılmasının güç olması, bu yapıların geri dönüşümünü sınırlandırabilir (Nilsen-Nygaard et al., 2021).

Nanomalzeme kullanılması, bir ambalajı tek başına aktif veya akıllı hâle getirmez. Polimer matrise yalnızca mekanik dayanımı veya gaz bariyerini geliştirmek amacıyla eklenen nanokil ya da nanoselüloz, nano-destekli fakat işlevsel açıdan pasif bir ambalaj oluşturabilir. Nanomalzeme antimikrobiyal etki gösteriyor, oksijeni tutuyor veya gıdadaki değişimi algılıyorsa sistem sırasıyla aktif ya da akıllı özellik kazanır. Sınıflandırmada malzemenin varlığından çok, yerine getirdiği işlev esas alınmalıdır (Kumar et al., 2020; Omerović et al., 2021).

Modifiye atmosferde ambalajlama da işlev temelinde değerlendirilmelidir. Ambalaj kapatılırken iç ortam havasının belirli bir gaz karışımıyla değiştirilmesi ürüne koruma sağlar. Ancak ambalaj filmi kapatma işleminden sonra ortamdan madde tutmuyor, bileşen salmıyor veya değişikliklere tepki vermiyorsa işlevsel olarak pasif kalır. Ambalaja oksijen tutucu, karbondioksit düzenleyici veya nem tutucu bir bileşen eklenmesi ise sistemi aktif hâle getirir (Soltani Firouz et al., 2021; Amin et al., 2022).

Pasif ambalajlarda gıda ile temas eden malzemenin tamamen tepkisiz olduğu varsayılmamalıdır. Polimer, katkı maddesi, mürekkep, yapıştırıcı veya kaplama bileşenlerinden

gıdaya istenmeyen madde geçişi meydana gelebilir. Bu nedenle pasif ambalajların da gıda ile temas eden malzemelere ilişkin güvenlik ve migrasyon koşullarını karşılaması gerekir. Avrupa Birliği'nin temel düzenlemesi, ambalaj bileşenlerinin insan sağlığına zarar verecek miktarda gıdaya geçmemesini ve gıdanın bileşimini ya da duyuşsal özelliklerini kabul edilemez biçimde değiştirmemesini öngörmektedir (European Parliament and Council, 2004).

2.2. Aktif Ambalajlar

Aktif ambalajlar, ambalajlanan gıdanın kalitesini korumak veya raf ömrünü uzatmak amacıyla gıda, ambalaj içi atmosfer ya da dış çevreyle kontrollü biçimde etkileşime giren sistemlerdir. Pasif ambalajlar esas olarak bariyer oluştururken aktif ambalajlar, ambalaj ortamındaki koşulları değiştiren veya dengeleyen ek bir işlev üstlenir.

Avrupa Birliği düzenlemelerinde aktif malzeme ve maddeler; ambalajlanan gıdanın raf ömrünü uzatmak veya durumunu korumak amacıyla tasarlanan, gıdaya ya da ambalaj ortamına bileşen salan veya bu ortamlardan madde tutan sistemler olarak tanımlanmaktadır. Aktif ambalajlar, genel gıda ile temas güvenliği kurallarının yanında özel hükümlere de tabidir (European Commission, 2009).

Aktif ambalaj sistemleri işlevlerine göre iki temel grupta incelenebilir:

- 1. Tutucu veya absorplayıcı sistemler:** Gıdanın bozulmasını hızlandıran ya da kalite kaybına yol açan maddeleri ambalaj ortamından uzaklaştırır. Oksijen, nem, etilen, karbondioksit ve istenmeyen koku bileşenlerini tutan sistemler bu gruptadır.
- 2. Salıcı veya yayıcı sistemler:** Gıdanın korunmasına katkı sağlayan maddeleri ambalaj ortamına veya kontrollü

biçimde gıda yüzeyine aktarır. Antimikrobiyal veya antioksidan bileşen salan, karbondioksit üreten ve aroma düzenleyen sistemler bu grupta değerlendirilir.

Aktif bileşenler ambalaja ayrı bir saşe, ped veya etiket biçiminde yerleştirilebilir. Aktif maddenin doğrudan polimer matrise, kaplama tabakasına veya ambalaj yüzeyine bağlandığı bütünlük sistemler de geliştirilmektedir. Saşe ve pedler uygulama kolaylığı sağlasa da tüketici tarafından yanlışlıkla açılma veya gıdayla karıştırılma riski taşır. Entegre sistemlerde ise aktif bileşenin üretim sıcaklığında kararlı kalması ve hedeflenen hızda salınması gerekir.

Oksijen tutucu sistemler et, balık, yağ, kuruyemiş, unlu mamul ve oksidasyona duyarlı içeceklerde kullanılabilir. Ambalaj içindeki oksijenin azaltılması lipid oksidasyonunu, renk değişimini, aroma kaybını ve aerobik mikroorganizmaların gelişimini sınırlandırabilir. Nem düzenleyici pedler özellikle taze et, tavuk, balık, peynir ve taze ürünlerde yüzeyde biriken sıvıyı kontrol eder. Etilen tutucular ise olgunlaşma sürecinde etilen üreten meyve ve sebzelerde solunum ve olgunlaşma hızının düzenlenmesine katkıda bulunabilir (Aday, 2021).

Antimikrobiyal aktif ambalajlarda organik asitler, bakteriyosinler, enzimler, bitki ekstraktları, uçucu yağlar, kitosan ve bazı metal veya metal oksit nanoparçacıkları kullanılabilir. Aktif maddenin ambalaj yapısına eklenmesi, koruyucu bileşenin doğrudan gıdaya yüksek miktarda katılması yerine gıda yüzeyinde veya ambalaj atmosferinde hedeflenmiş bir etki oluşturabilir. Bu özellik, mikrobiyal bozulmanın çoğunlukla yüzeyde başladığı et, balık, peynir ve taze kesilmiş ürünler açısından önemlidir (Asgher et al., 2020; Sharma et al., 2021).

Aktif ambalajın etkinliği yalnızca kullanılan bileşenin niteliğine bağlı değildir. Gıdanın su aktivitesi, yağ ve protein

içeriği, pH değeri, depolama sıcaklığı, ambalaj içi gaz bileşimi, hedef raf ömrü ve başlangıç mikrobiyal yükü sistemin performansını etkileyebilir. Aynı aktif bileşen farklı gıda matrislerinde farklı sonuçlar verebilir. Bu nedenle aktif ambalaj tasarımı, ambalaj malzemesi ile gıdanın bozulma mekanizmasının birlikte değerlendirildiği ürüne özgü bir yaklaşım gerektirir.

Aktif ambalajın ayırt edici özelliği, gıda veya ambalaj ortamında koruyucu bir değişiklik meydana getirmesidir. Bu değişimi ölçmesi veya tüketiciye bildirmesi gerekmez. Örneğin oksijen tutucu bir saşe ambalaj içindeki oksijeni azaltabilir; ancak kalan oksijen miktarı hakkında bilgi vermiyorsa aktif olmakla birlikte akıllı değildir.

2.3. Akıllı Ambalajlar

Akıllı ambalajlar; gıdanın kalite ve güvenlik durumunu, ambalaj bütünlüğünü veya ürünün maruz kaldığı çevresel koşulları izleyen, algılayan, kaydeden ve elde edilen bilgiyi üreticiye, dağıtıcıya ya da tüketiciye ileten sistemlerdir. Temel işlevleri gıdanın durumunu doğrudan değiştirmek değil, ürün hakkında bilgi üretmektir. Bu bilgi renk değişimi, sayısal değer, elektronik sinyal veya dijital kayıt biçiminde sunulabilir (Soltani Firouz et al., 2021; Cheng et al., 2022).

Literatürde “akıllı ambalaj”, “intelligent packaging” ve “smart packaging” terimleri farklı kapsamlarla kullanılabilmektedir. Bazı çalışmalarda smart packaging, aktif koruma, algılama, iletişim ve dijital izlenebilirlik işlevlerini birlikte içeren daha geniş bir üst kavramdır. Bu bölümde kavramsal açıklık amacıyla “aktif ambalaj” gıdanın veya ambalaj ortamının durumuna müdahale eden; “akıllı ambalaj” ise bu durumu izleyerek bilgi sağlayan sistemleri tanımlamaktadır.

Akıllı ambalaj teknolojileri üç ana grupta sınıflandırılabilir:

- **İndikatörler:** Belirli bir değişkenin veya olayın gerçekleştiğini renk, şekil ya da başka bir görsel değişimle gösterir.
- **Sensörler ve biyosensörler:** Kimyasal, fiziksel veya biyolojik bir değişkeni algılayarak ölçülebilir bir sinyale dönüştürür.
- **Veri taşıyıcı ve iletişim sistemleri:** Ürünün kimliği, üretim bilgileri, lojistik geçmişi ve izlenebilirlik verilerini depolar veya iletir.

Zaman-sıcaklık indikatörleri, gıdanın dağıtım ve depolama sırasında maruz kaldığı sıcaklık geçmişinin ürün kalitesi üzerindeki birikimli etkisini gösterir. Bu sistemler özellikle soğuk zincire bağımlı et, balık, süt ürünleri, dondurulmuş gıdalar ve hazır yemekler açısından önemlidir. Anlık sıcaklık ölçümünden farklı olarak zaman-sıcaklık indikatörleri, sıcaklık sapmasının süresi ile şiddetini birlikte yansıtmaya çalışır.

Tazelik göstergeleri, gıdada mikrobiyal veya biyokimyasal bozulma sırasında oluşan metabolitlere tepki verir. Uçucu aminler, organik asitler, hidrojen sülfür, karbondioksit ve pH değişimi bu sistemlerde izlenen başlıca göstergelerdir. Özellikle et, tavuk, balık ve deniz ürünlerinde proteinlerin parçalanmasıyla oluşan uçucu bazik bileşikler gösterge geliştirilmesinde kullanılmaktadır. Antosiyanin, betalain ve kurkumin gibi doğal pigmentler, ortamın pH değerine bağlı renk değiştirdikleri için biyopolimer temelli kolorimetrik göstergelerde araştırılmaktadır (Shao et al., 2021).

Gaz göstergeleri, ambalaj içindeki oksijen, karbondioksit veya diğer gazların varlığını izleyebilir. Oksijen göstergeleri vakum veya modifiye atmosfer ambalajlarında sızıntının ya da ambalaj bütünlüğünün bozulduğunun belirlenmesine yardımcı olabilir. Karbondioksit göstergeleri ise mikrobiyal gelişme veya

gıdanın solunumu sonucunda oluşan değişikliklerin izlenmesinde kullanılabilir.

Sensörler, indikatörlere göre daha karmaşık sistemlerdir. Genel olarak hedef bileşeni tanıyan bir algılama bölümü ile bu etkileşimi ölçülebilir sinyale dönüştüren bir dönüştürücüden oluşurlar. Biyosensörlerde antikor, enzim, nükleik asit veya mikroorganizma gibi biyolojik tanıma elemanları kullanılabilir. Bu sistemler belirli patojenlerin, toksinlerin veya bozulma ürünlerinin tespitine yönelik daha seçici ölçümler sağlayabilir. Bununla birlikte gerçek gıda ortamındaki kararlılık, seçicilik, tespit sınırı, kalibrasyon ve ekonomik uygulanabilirlik ticarileşme açısından belirleyicidir.

Radyo frekanslı tanımlama (RFID) ve yakın alan iletişimi (NFC) sistemleri, ürün bilgilerinin temassız biçimde okunmasını ve tedarik zinciri boyunca izlenmesini sağlayabilir. Sıcaklık veya nem sensörleriyle birleştirildiklerinde çevresel koşulları kaydeden akıllı izleme araçlarına dönüşebilirler. Buna karşılık yalnızca sabit bir web adresine yönlendiren QR kod, gıdanın durumunu algılamaz. QR kodlar ile temel RFID etiketleri öncelikle veri taşıma ve izlenebilirlik araçlarıdır; sensörlerle bütünleştirildiklerinde gerçek zamanlı kalite izlemesine katkıda bulunabilirler (Yüceer & Caner, 2023).

Akıllı ambalaj göstergelerinin ürünün gerçek kalite veya güvenlik durumunu doğru biçimde yansıtması gerekir. Göstergenin gıdadan daha erken veya daha geç tepki vermesi tüketiciyi yanıltabilir. Renk değişiminin farklı ışık koşullarında algılanabilmesi, göstergenin anlamının kolayca anlaşılması ve gösterge bilgisinin etiket üzerindeki tarih ve saklama bilgileriyle nasıl birlikte yorumlanacağını açıklanması önemlidir. Bu nedenle teknik doğruluk kadar bilginin açık sunulması da tasarımın bir parçasıdır.

Pasif, aktif ve akıllı sistemler birbirini dışlayan mutlak kategoriler değildir. Aynı ambalajda pasif bariyer, aktif koruma ve akıllı izleme işlevleri birlikte bulunabilir. Örneğin oksijen bariyeri sağlayan bir biyopolimer film, antimikrobiyal bileşeni kontrollü olarak salabilir ve ambalaj içindeki pH değişimini renk değişimiyle gösterebilir. Bu yapılar çok işlevli veya bütünleşik ambalaj sistemleri olarak değerlendirilmektedir (Bhargava et al., 2020; Amin et al., 2022; Yıldırım Ayaydın & Dursun Çapar, 2026).

3. SONUÇ

Yeni nesil gıda ambalajlarının doğru değerlendirilmesi, farklı kavramların aynı sınıflandırma düzeyinde ele alınmamasına bağlıdır. Pasif, aktif ve akıllı ambalaj ayrımı sistemin gıdayı nasıl koruduğunu ve bilgi üretip üretmediğini açıklar. Buna karşılık biyobazlılık hammadde kaynağını, biyobozunurluk ve kompostlanabilirlik ise kullanım sonu davranışını tanımlar. Nano-destekli yapı, yenilebilir kaplama veya çok katmanlı tasarım gibi özellikler de malzemenin yapısal ve teknolojik niteliğine ilişkindir. Bu eksenler birbirinden bağımsız olmakla birlikte aynı ambalaj sisteminde bir araya gelebilir.

Bu çerçeve, bir ambalajın yalnızca “biyobozunur”, “aktif” veya “akıllı” olarak adlandırılmasının teknik yeterliliğini açıklamadığını göstermektedir. Ambalajın hammadde kaynağı, koruma mekanizması, bilgi üretme biçimi, gıdayla etkileşimi ve kullanım sonu koşulları birlikte belirtilmelidir. Özellikle biyobazlılık ile biyobozunurluğun eş anlamlı kabul edilmesi veya endüstriyel kompostlanabilirliğin doğal ortamda hızlı bozunma şeklinde yorumlanması, çevresel iddiaların yanlış değerlendirilmesine yol açabilir. Benzer biçimde nanomalzeme içeren her ambalaj aktif, veri taşıyan her etiket de akıllı sensör

değildir; sınıflandırmayı belirleyen, bileşenin sistem içindeki işlevidir.

Sonuç olarak yeni nesil ambalaj tasarımı, teknoloji odaklı bir seçimden önce ürünün bozulma mekanizmasını ve gerekli koruma işlevini tanımlamalıdır. Uygun sistem; gıda güvenliği ve raf ömrü performansının yanı sıra migrasyon, tüketiciye sunulan bilginin doğruluğu, üretilebilirlik ve gerçek kullanım sonucu altyapısıyla uyum bakımından da doğrulanmalıdır. Bu çok eksenli yaklaşım, yeni nesil gıda ambalajlarının kavramsal olarak tutarlı biçimde tanımlanmasına ve farklı teknolojilerin karşılaştırılmasına temel oluşturur. Biyogüvenlik, ekonomik uygulanabilirlik ve çevresel yaşam döngüsü sonuçları ise bu sınıflandırma çerçevesini tamamlayan ayrı değerlendirme boyutlarıdır.

KAYNAKÇA

- Aday, M. S. (2021). Meyve ve sebzelerde aktif ambalajlama teknolojisinin kullanımı. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (21), 122–130. doi:10.31590/ejosat.840317
- Amin, U., Khan, M. K. I., Maan, A. A., Nazir, A., Riaz, S., Khan, M. U., . . . Lorenzo, J. M. (2022). Biodegradable active, intelligent, and smart packaging materials for food applications. *Food Packaging and Shelf Life*, 33, 100903. doi:10.1016/j.fpsl.2022.100903
- Asgher, M., Qamar, S. A., Bilal, M., & Iqbal, H. M. N. (2020). Bio-based active food packaging materials: Sustainable alternative to conventional petrochemical-based packaging materials. *Food Research International*, 137, 109625. doi:10.1016/j.foodres.2020.109625
- Bhargava, N., Sharanagat, V. S., Mor, R. S., & Kumar, K. (2020). Active and intelligent biodegradable packaging films using food and food waste-derived bioactive compounds: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 105, 385–401. doi:10.1016/j.tifs.2020.09.015
- Cheng, H., Xu, H., McClements, D. J., Chen, L., Jiao, A., Tian, Y., . . . Jin, Z. (2022). Recent advances in intelligent food packaging materials: Principles, preparation and applications. *Food Chemistry*, 375, 131738. doi:10.1016/j.foodchem.2021.131738
- European Commission. (2009). Commission Regulation (EC) No 450/2009 of 29 May 2009 on active and intelligent materials and articles intended to come into contact with food. *Official Journal of the European Union*, L 135, 3–11.

- European Parliament and Council. (2004). Regulation (EC) No 1935/2004 of 27 October 2004 on materials and articles intended to come into contact with food. *Official Journal of the European Union*, L 338, 4–17.
- Kumar, S., Mukherjee, A., & Dutta, J. (2020). Chitosan based nanocomposite films and coatings: Emerging antimicrobial food packaging alternatives. *Trends in Food Science & Technology*, 97, 196–209. doi:10.1016/j.tifs.2020.01.002
- Nilsen-Nygaard, J., Noriega Fernández, E., Radusin, T., Rotabakk, B. T., Sarfraz, J., Sharmin, N., . . . Pettersen, M. K. (2021). Current status of biobased and biodegradable food packaging materials: Impact on food quality and effect of innovative processing technologies. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 20(2), 1333–1380. doi:10.1111/1541-4337.12715
- Omerović, N., Djisalov, M., Živojević, K., Mladenović, M., Vunduk, J., Milenković, I., . . . Vidić, J. (2021). Antimicrobial nanoparticles and biodegradable polymer composites for active food packaging applications. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 20(3), 2428–2454. doi:10.1111/1541-4337.12727
- Shao, P., Liu, L., Yu, J., Lin, Y., Gao, H., Chen, H., & Sun, P. (2021). An overview of intelligent freshness indicator packaging for food quality and safety monitoring. *Trends in Food Science & Technology*, 118, 285–296. doi:10.1016/j.tifs.2021.10.012
- Sharma, S., Barkauskaite, S., Jaiswal, A. K., & Jaiswal, S. (2021). Essential oils as additives in active food packaging. *Food Chemistry*, 343, 128403. doi:10.1016/j.foodchem.2020.128403

- Soltani Firouz, M., Mohi-Alden, K., & Omid, M. (2021). A critical review on intelligent and active packaging in the food industry: Research and development. *Food Research International*, 141, 110113. doi:10.1016/j.foodres.2021.110113
- Yao, Q.-B., Huang, F., Lu, Y.-H., Huang, J.-M., Ali, M., Jia, X.-Z., . . . Huang, Y.-Y. (2024). Polysaccharide-based food packaging and intelligent packaging applications: A comprehensive review. *Trends in Food Science & Technology*, 147, 104390. doi:10.1016/j.tifs.2024.104390
- Yıldırım Ayaydın, T., & Dursun Çapar, T. (2026). Aktif ambalajlama uygulamaları ve akıllı ambalaj teknolojileri ile izlenebilirlik uygulamalarının gıda güvenliği üzerindeki etkileri. *Gıda*, 51(3), 633–660. doi:10.15237/gida.GD26004
- Yüceer, M., & Caner, C. (2023). Gıda sanayiinde akıllı ambalajlama ve uygulamaları. *Gıda ve Yem Bilimi Teknolojisi Dergisi*, (30), 57–68. doi:10.56833/gidaveyem.1329885

GIDA AMBALAJLAMADA BİYOBOZUNUR MALZEMELER: TEMEL İLKELER, POLİMER TÜRLERİ

Evren ÇAĞLARER¹

1. GİRİŞ

Biyobozunur ambalaj, uygun çevresel koşullarda mikroorganizmalar ve enzimler aracılığıyla düşük molekül ağırlıklı bileşiklere ayrılabilen; daha sonra karbondioksit, su, biyokütle ve oksijensiz koşullarda metan gibi son ürünlere dönüşebilen ambalaj sistemlerini ifade eder. Ancak biyobozunurluk, malzemenin her ortamda kısa sürede ve kalıntı bırakmadan parçalanacağı anlamına gelmez (Shaikh, Yaqoob, & Aggarwal, 2021; Kim, Thelusmond, Albright, & Chai, 2023).

Biyobozunur malzemenin ambalaj olarak kullanılabilmesi için yalnızca kullanım sonrası parçalanabilir olması yeterli değildir. Malzemenin üretim, dolum, taşıma ve depolama boyunca mekanik bütünlüğünü koruması; gıdanın nem, oksijen ve aroma geçişine ilişkin gereksinimlerini karşılaması; gıdayla temas güvenliği ölçütlerine uygun olması ve mevcut ambalajlama ekipmanlarında işlenebilmesi gerekir (Nilsen-Nygaard et al., 2021).

Biyobazlılık, biyobozunurluk ve kompostlanabilirlik bu bölümde ayrı ölçütler olarak ele alınmaktadır. Hammadde kaynağı, polimerin kimyasal yapısı ve kullanım sonrası bozunma ortamı birbirinden farklı değerlendirme eksenleri olduğundan,

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Kırklareli Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, ORCID: 0000-0002-1343-4751.

çevresel iddiaların geçerli olabilmesi için malzemenin hangi koşullarda ve hangi standartlara göre değerlendirildiği açıkça belirtilmelidir (International Organization for Standardization [ISO], 2021; Nizamuddin & Chen, 2024).

Bu çerçevede nişasta, selüloz, kitosan, aljinat ve proteinler gibi doğal polimerler ile PLA, PHA, PBS ve PBAT gibi biyolojik olarak parçalanabilir termoplastikler; kaynakları, yapısal özellikleri, üstünlükleri ve sınırlılıkları bakımından incelenmektedir (Kumari, Pakshirajan, & Pugazhenth, 2022).

2. BİYOBOZUNURLUĞUN TEMEL İLKELERİ

Biyobozunma, polimerik bir malzemenin çevresel ve biyolojik etkenler sonucunda yapısal bütünlüğünü kaybetmesi ve bileşenlerinin mikroorganizmalar tarafından metabolik süreçlere dâhil edilmesiyle gerçekleşen çok aşamalı bir süreçtir. Malzemenin görünür biçimde parçalanması tek başına biyobozunmanın tamamlandığını göstermemektedir. Gerçek biyobozunmanın değerlendirilmesinde polimer karbonunun karbondioksit, su, biyokütle ve anaerobik koşullarda metan gibi son ürünlere dönüşme düzeyinin belirlenmesi gerekmektedir (ISO, 2012; Nizamuddin & Chen, 2024).

2.1. Biyobazlı, biyobozunur ve kompostlanabilir malzemeler

Biyobazlı malzemeler, biyokütle kökenli yenilenebilir hammaddelerden tamamen veya kısmen üretilen malzemelerdir. Mısır ve patates nişastası, şeker kamışı, selüloz, bitkisel proteinler, deniz yosunları ve mikrobiyal fermentasyon ürünleri bu amaçla kullanılabilir. Bununla birlikte biyobazlılık, doğrudan biyobozunurluk anlamına gelmez. Örneğin biyokütle kaynaklı etilenden üretilen biyo-polietilen yenilenebilir karbon

içerebilmesine karşın geleneksel polietilenle aynı kimyasal yapıya sahip olduğundan biyobozunur değildir.

Biyobozunur malzemeler ise kaynağından bağımsız olarak uygun koşullar altında mikroorganizmalar tarafından parçalanabilen malzemelerdir. PBAT (polybutylene adipate terephthalate) gibi bazı biyobozunur polimerler tamamen veya kısmen fosil kaynaklardan üretilebilir. Dolayısıyla bir malzemenin çevresel niteliği değerlendirilirken hammadde kaynağı ile kullanım sonrası bozunma davranışının ayrı ölçütler olarak ele alınması gerekmektedir (Nizamuddin & Chen, 2024).

Kompostlanabilir malzemeler, belirlenmiş kompostlama koşullarında biyolojik olarak parçalanabilen ve kompost kalitesini olumsuz etkilemeyen biyobozunur malzemelerdir. ISO 17088'e göre endüstriyel kompostlanabilirlik değerlendirmesinde parçalanma, nihai aerobik biyobozunma, kompostun karasal organizmalar üzerindeki etkileri ve malzeme bileşenlerinin kontrolü birlikte ele alınmaktadır (ISO, 2021). Bu nedenle yalnızca kütle kaybı veya filmin gözle görülür biçimde dağılması, kompostlanabilirlik iddiası için yeterli değildir.

Yenilebilir film ve kaplamalar da biyobozunur ambalajlarla ilişkilidir; ancak “yenilebilir” ve “biyobozunur” kavramları eş anlamlı değildir. Yenilebilir ambalajların insan tüketimine uygun hammaddelerden üretilmesi ve gıda güvenliği şartlarını karşılaması gerekir. Biyobozunur bir polimer ise gıdayla temasa uygun olsa bile yenilebilir olmayabilir.

2.2. Biyobozunma mekanizması

Polimerlerin biyobozunması genel olarak birbiriyle ilişkili dört aşamada incelenebilir:

- 1. Biyolojik ve çevresel yıpranma:** Isı, nem, ultraviyole ışık, mekanik gerilim ve mikroorganizmaların yüzeye tutunması sonucunda malzemenin yüzey yapısı değişir.

Çatlak, gözenek ve yüzey pürüzlülüğünün artması, suyun ve enzimlerin polimer içerisine taşınmasını kolaylaştırabilir.

2. **Depolimerizasyon:** Polimer zincirleri hidroliz, oksidasyon veya enzimatik tepkimeler yoluyla daha düşük molekül ağırlıklı oligomer ve monomerlere ayrılır. Ester, amid ve glikozidik bağ gibi hidrolize veya enzimatik parçalanmaya duyarlı bağların varlığı bu aşamayı kolaylaştırmaktadır.
3. **Biyotasimilasyon:** Oluşan düşük molekül ağırlıklı bileşikler mikroorganizmaların hücre zarından geçerek enerji ve biyokütle üretiminde kullanılır.
4. **Mineralizasyon:** Organik karbon aerobik koşullarda büyük ölçüde karbondioksit, su ve biyokütleyle; anaerobik koşullarda ise karbondioksit, metan, su ve biyokütleyle dönüştürülür (Kim et al., 2023; Nizamuddin & Chen, 2024).

Bu aşamaların tümü her malzemede aynı hızda veya kesin bir sıra içerisinde gerçekleşmez. Özellikle kalın, yüksek kristalli veya hidrofobik malzemelerde yüzey aşınması ile zincir kırılması yavaş ilerleyebilir. Doğal polisakkaritlerde ise su alımı ve mikrobiyal enzimlerin etkisi daha hızlı gerçekleşebilir.

2.3. Polimer yapısının biyobozunmaya etkisi

Polimer omurgasındaki kimyasal bağlar biyobozunma davranışının temel belirleyicilerindendir. Glikozidik bağlar içeren nişasta ve selüloz ile ester bağları içeren PLA, PHA, PBS ve PBAT gibi polimerler, uygun koşullarda hidrolitik veya enzimatik zincir kırılmasına uğrayabilmektedir. Buna karşılık yalnızca karbon-karbon bağlarından oluşan polietilen ve polipropilen gibi polimerler mikrobiyal bozunmaya karşı daha dirençlidir (Kim et al., 2023).

Kristallik derecesi de biyobozunma hızını önemli ölçüde etkilemektedir. Düzenli ve sıkı paketlenmiş kristal bölgelerde suyun ve enzimlerin polimer zincirlerine erişimi sınırlıdır. Bu nedenle bozunma çoğunlukla daha düzensiz yapıdaki amorf bölgelerde başlamaktadır. Kristallik oranı yüksek polimerlerde biyobozunma ilerledikçe amorf bölgeler öncelikle uzaklaşabilir ve kalan malzemenin göreceli kristallik derecesi artabilir.

Molekül ağırlığının yüksek olması, zincirlerinin mikroorganizmalar tarafından doğrudan alınmasını engellemektedir. Bu nedenle yüksek molekül ağırlıklı polimerlerin önce oligomer ve monomerlere ayrılması gerekir. Molekül ağırlığı, dallanma derecesi, çapraz bağ yoğunluğu, yan zincirlerin yapısı ve hidrofilik-hidrofobik denge biyobozunma hızını birlikte belirlemektedir.

2.4. Malzemeye ve çevreye bağlı etkenler

Film kalınlığı, yüzey alanı, gözeneklilik ve yüzey pürüzlülüğü bozunma hızını etkileyen fiziksel özelliklerdir. İnce ve geniş yüzey alanına sahip filmler, çevreyle daha fazla temas ettikleri için kalın ve yoğun yapılara göre daha hızlı parçalanabilmektedir. Plastikleştiriciler su alımını ve zincir hareketliliğini artırarak bozunmayı hızlandırabilirken yoğun çapraz bağlanma, hidrofobik kaplama ve bazı nanodolgular su ve enzim geçişini sınırlandırarak bozunmayı yavaşlatabilir.

Sıcaklık, nem, oksijen, pH, mikrobiyal popülasyon ve besin maddelerinin varlığı çevresel biyobozunmanın temel değişkenleridir. Endüstriyel kompostlama tesislerinde sıcaklık, havalandırma ve nemin kontrol edilmesi, bozunma sürecini doğal toprak veya su ortamlarına göre hızlandırabilmektedir. Bu nedenle endüstriyel kompostlanabilir olarak sınıflandırılan bir malzemenin ev kompostunda, deniz suyunda veya açık çevrede aynı sürede parçalanacağı varsayılmaz (ISO, 2021).

Kontrollü kompostlama ortamında nihai aerobik biyobozunma, açığa çıkan karbondioksitin ölçülmesine dayanan ISO 14855-1 yöntemiyle belirlenebilmektedir. Toprak ortamındaki aerobik biyobozunmanın değerlendirilmesinde ise oksijen tüketimi veya açığa çıkan karbondioksit miktarını esas alan ISO 17556 kullanılmaktadır (ISO, 2012, 2019). Farklı test ortamlarında elde edilen sonuçların doğrudan karşılaştırılması, sıcaklık, mikrobiyal inokulum, numune geometrisi ve test süresi farklılıkları nedeniyle dikkatle yapılmalıdır. Biyobozunmayı etkileyen başlıca malzeme ve çevre faktörleri Tablo 1’de özetlenmiştir.

Tablo 1. Biyobozunmayı etkileyen başlıca faktörler

Faktör grubu	Başlıca değişkenler	Biyobozunma üzerindeki genel etkisi
Kimyasal yapı	Hidrolize duyarlı bağlar, yan gruplar, çapraz bağlanma	Erişilebilir ester ve glikozidik bağlar bozunmayı kolaylaştırırken yoğun çapraz bağlanma yavaşlatabilir.
Moleküler özellikler	Molekül ağırlığı, zincir hareketliliği	Düşük molekül ağırlığı ve yüksek zincir hareketliliği genellikle bozunmayı kolaylaştırır.
Morfoloji	Kristallik, amorf bölge oranı	Yüksek kristallik su ve enzim erişimini sınırlayabilir.
Fiziksel yapı	Kalınlık, yüzey alanı, gözeneklilik	İnce, gözenekli ve geniş yüzeyli malzemeler daha hızlı bozunabilir.
Katkı maddeleri	Plastikleştirici, dolgu, pigment, çapraz bağlayıcı	Katkının kimyasal yapısına ve dağılımına bağlı olarak bozunma hızlanabilir veya yavaşlayabilir.
Çevresel koşullar	Sıcaklık, nem, pH, oksijen, mikroorganizma	Uygun sıcaklık, nem ve aktif mikrobiyal topluluk bozunmayı destekler.
Atık yönetimi	Endüstriyel kompost, ev kompostu, toprak, su ortamı	Aynı malzeme farklı ortamlarda önemli ölçüde farklı bozunma davranışı gösterebilir.

3. BİYOBOZUNUR AMBALAJ MALZEMELERİ

Biyobozunur ambalaj malzemeleri genel olarak doğal polimerler, mikrobiyal kökenli polimerler ve kimyasal sentezle üretilen biyobozunur polimerler şeklinde sınıflandırılabilir. Nişasta, selüloz, kitosan, aljinat ve proteinler doğal kaynaklı polimerler arasında yer almaktadır. PHA mikroorganizmalar tarafından sentezlenirken PLA çoğunlukla fermantasyonla elde edilen laktik asidin polimerizasyonu ile üretilmektedir. PBS ve PBAT ise monomer kaynağına bağlı olarak biyobazlı veya fosil kökenli olabilmekle birlikte uygun koşullarda biyobozunabilen termoplastiklerdir (Kumari et al., 2022; Nilsen-Nygaard et al., 2021; Kılınç, Tomar, & Çağlar, 2017).

3.1. Nişasta

Nişasta; mısır, patates, buğday, pirinç ve manyok gibi bitkisel kaynaklardan elde edilen, doğada yaygın bulunan bir polisakkarittir. Temel olarak doğrusal yapıya amiloz ile dallanmış yapıya amilopektinden oluşmaktadır. Amiloz ve amilopektin oranı, nişastanın botanik kaynağı ve uygulanan işlemler filmin mekanik, optik ve bariyer özelliklerini etkilemektedir (Cheng et al., 2021).

Doğal nişasta granülleri doğrudan termoplastik özellik göstermez. Isı, mekanik kesme ve su veya gliserol, sorbitol gibi plastikleştiricilerin etkisiyle granüler yapı bozulmakta ve termoplastik nişasta elde edilmektedir. Nişasta filmlerinin düşük maliyetli, yenilenebilir, saydam ve iyi film oluşturabilen yapısı önemli avantajlar sağlamaktadır. Ayrıca kuru koşullarda oksijen ve aroma bileşenlerine karşı etkili bariyer oluşturabilir.

Nişastanın hidrofilik yapısı, yüksek bağıl nem koşullarında su almasına, şişmesine ve mekanik özelliklerini kaybetmesine neden olabilmektedir. Plastikleştirici içeriğinin artması esnekliği yükseltirken çekme dayanımını ve su buharı bariyerini azaltabilir. Depolama sırasında nişasta zincirlerinin

yeniden düzenlenmesiyle ortaya çıkan retrogradasyon ise filmin zamanla sertleşmesine ve kırılma eğilimine yol açabilir (Cheng et al., 2021).

Nişasta esaslı malzemelerin performansı kimyasal modifikasyon, çapraz bağlama, hidrofobik bileşen eklenmesi, başka biyopolimerlerle harmanlama ve nanoölçekli takviye maddelerinin kullanılmasıyla geliştirilebilmektedir. Bununla birlikte yapılan her modifikasyonun gıdalla temas güvenliği ve biyobozunma üzerindeki etkisi ayrıca değerlendirilmelidir.

3.2. Selüloz ve türevleri

Selüloz, β -1,4-glikozidik bağlarla bağlanmış glikoz birimlerinden oluşan ve bitki hücre duvarlarının temel yapısal bileşenini meydana getiren bir polisakkarittir. Odun, pamuk, tarımsal atıklar ve bazı mikroorganizmalar selüloz kaynağı olarak kullanılabilir. Selülozun yüksek mekanik dayanımı, yenilenebilirliği ve lifli yapısı, ambalaj kâğıtlarında ve biyokompozitlerde kullanımını desteklemektedir.

Selüloz kaynağı yalnızca birincil bitkisel hammaddelerle sınırlı değildir. Pamuk bakımından zengin tekstil atıklarından asit hidrolizi ve NaOH/üre işlemleriyle mikro ve nanokristalin selüloz üretilmesi, selüloz içeren ikincil hammaddelerin yüksek katma değerli malzemelere dönüştürülebileceğini göstermektedir (Işıtan et al., 2025). Bununla birlikte, tekstil atıklarından elde edilen selülozun gıdalla temas eden ambalajlarda kullanılabilmesi için saflık, kimyasal kalıntı, migrasyon ve toksikolojik güvenlik bakımından ayrıca değerlendirilmesi gerekmektedir.

Doğal selüloz, molekül içi ve moleküller arası güçlü hidrojen bağları nedeniyle yaygın çözücülerde çözünmez ve eritilerek işlenemez. Bu nedenle ambalaj üretiminde rejenere selülozun yanı sıra metilselüloz, hidroksipropil metilselüloz ve karboksimetilselüloz gibi türevlerden yararlanılmaktadır.

Bakteriyel selüloz ise yüksek saflığı, ince fibril ağı, su tutma kapasitesi ve mekanik dayanımı nedeniyle film ve kompozit geliştirme çalışmalarında öne çıkmaktadır (Cazón & Vázquez, 2021). Atık çaydan elde edilen bakteriyel selülozun fizikokimyasal ve antimikrobiyal özelliklerinin incelenmesi, gıda kaynaklı atıkların işlevsel bakteriyel selüloz üretiminde hammadde olarak değerlendirilebileceğini göstermektedir (Gök et al., 2025).

Selüloz esaslı filmler kuru koşullarda oksijen ve aroma bileşenlerine karşı iyi bariyer gösterebilir. Bununla birlikte hidroksil gruplarının fazlalığı, malzemenin neme duyarlı olmasına neden olmaktadır. Selülozun yüzey modifikasyonu, hidrofobik tabakalarla kaplanması veya lipit ve biyobozunur polyesterlerle birleştirilmesi su buharı bariyerini geliştirebilir. Ancak kaplama, yapıştırıcı ve katkı maddelerinin kompostlanabilirlik ile geri dönüşüm davranışını değiştirebileceği göz önünde bulundurulmalıdır.

3.3. Kitosan

Kitosan, kabuklu deniz ürünleri atıkları ve mantar hücre duvarları gibi kaynaklarda bulunan kitinin deasetilasyonu sonucunda elde edilen katyonik bir polisakkarittir. Film oluşturma yeteneği, biyoyumluluğu, biyobozunurluğu ve belirli koşullarda gösterdiği antimikrobiyal aktivite nedeniyle biyobozunur ambalaj araştırmalarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Priyadarshi & Rhim, 2020).

Kitosanın amino grupları asidik ortamda protonlanarak pozitif yük kazanır. Bu özellik, negatif yüklü mikrobiyal hücre yüzeyleriyle etkileşim kurulmasına katkıda bulunabilir. Bununla birlikte antimikrobiyal etkinlik; kitosanın molekül ağırlığına, deasetilasyon derecesine, ortam pH'sına, mikroorganizma türüne ve film içerisindeki diğer bileşenlere bağlıdır. Dolayısıyla kitosan

içeren her filmin aynı düzeyde antimikrobiyal etki göstereceği kabul edilmemelidir.

Saf kitosan filmleri genellikle iyi oksijen bariyeri ve yeterli mekanik dayanım göstermekle birlikte neme duyarlıdır ve bazı koşullarda kırılğan olabilir. Plastikleştiriciler esnekliği artırabilir; nişasta, jelatin, selüloz türevleri ve biyobozunur polyesterlerle yapılan karışımlar ise mekanik ve bariyer özelliklerin dengelenmesini sağlayabilir. Kabuklu deniz ürünü atıklarının değerlendirilmesi bakımından döngüsel ekonomi potansiyeli taşımasına karşın hammadde saflaştırma işlemleri, alerjenlerle ilişkili riskler ve üretim süreçlerinin çevresel etkileri dikkate alınmalıdır.

3.4. Aljinat

Aljinat, çoğunlukla kahverengi deniz yosunlarından elde edilen ve mannuronik asit ile guluronik asit birimlerinden oluşan anyonik bir polisakkarittir. Suda çözünebilmesi, film oluşturabilmesi ve kalsiyum gibi iki değerlikli iyonlarla çapraz bağlanarak jel meydana getirmesi, aljinatı film ve kaplama üretiminde elverişli hâle getirmektedir (Parreidt, Müller, & Schmid, 2018).

Kalsiyum iyonları, aljinat zincirlerinin özellikle guluronik asitçe zengin bölgeleri arasında iyonik köprüler oluşturarak “yumurta kutusu” olarak adlandırılan üç boyutlu yapıyı meydana getirir. Çapraz bağlama işlemi filmin suya karşı direncini ve mekanik bütünlüğünü artırabilir. Bununla birlikte aşırı çapraz bağlanma esnekliği azaltabilir ve kırılğanlığa neden olabilir.

Aljinat filmleri saydam, kokusuz ve iyi film oluşturabilen yapıdadır; ancak hidrofilik özellikleri nedeniyle su buharına karşı sınırlı bariyer gösterir. Lipitler, proteinler, kitosan veya nanoselüloz gibi bileşenlerle oluşturulan kompozit yapılar bu sınırlılığın azaltılmasına yardımcı olabilir. Aljinatın kaynağı,

molekül ağırlığı ve mannuronik asit/guluronik asit oranı, elde edilen filmin özellikleri üzerinde belirleyicidir.

3.5. Protein esaslı malzemeler

Jelatin, kolajen, peynir altı suyu proteini, kazein, soya proteini, buğday gluteni ve zein gibi hayvansal veya bitkisel kökenli proteinlerden biyobozunur film ve kaplamalar üretilmektedir. Protein zincirleri arasındaki hidrojen bağları, iyonik etkileşimler, hidrofobik etkileşimler ve disülfid bağları film ağının oluşumuna katkı sağlamaktadır (Zhang, Liu, Han, Ren, & Jiang, 2024).

Protein filmleri özellikle düşük bağıl nem koşullarında oksijene karşı etkili bariyer oluşturabilir. Protein yapısındaki farklı fonksiyonel gruplar, antioksidan ve antimikrobiyal maddelerin film matrisine bağlanmasına veya kontrollü olarak salınmasına olanak sağlayabilir. Bununla birlikte protein filmlerinin çoğu hidrofilik özellik gösterdiğinden su buharı bariyerleri sınırlıdır. Plastikleştirici kullanımı esnekliği artırırken fazla plastikleştirici mekanik dayanımı azaltabilir.

Protein esaslı ambalajlarda hammadde kaynağının sürekliliği, hayvansal kaynaklara ilişkin tüketici tercihleri ve dini hassasiyetler, alerjenite, koku ve renk gibi konular dikkate alınmalıdır. Özellikle süt, soya ve gluten proteinlerinin kullanıldığı yenilebilir veya gıdayla doğrudan temas eden sistemlerde alerjen bildirimi ve göç değerlendirmeleri önem taşımaktadır.

3.6. Polilaktik asit

PLA, çoğunlukla şeker veya nişasta içeren hammaddelerden fermentasyonla elde edilen laktik asidin polimerizasyonu yoluyla üretilen alifatik bir polyesterdir. Saydamlığı, sertliği, aroma bariyeri, termoplastik işlenebilirliği ve mevcut ekstrüzyon ile termoform ekipmanlarında

işlenebilmesi nedeniyle biyobozunur ambalajlar içerisinde ticari açıdan öne çıkan polimerlerden biridir (Swetha et al., 2023).

PLA'nın başlıca sınırlılıkları kırılgenlik, düşük darbe dayanımı, görece düşük ısıl deformasyon sıcaklığı ve bazı gıdalar için yetersiz kalabilen gaz ve su buharı bariyeridir. Kopolimerizasyon, plastikleştirme, tavlama, lif veya nanodolgu ilavesi ve diğer biyobozunur polimerlerle harmanlama yoluyla bu özellikler geliştirilebilmektedir.

PLA'nın biyobozunması genellikle ester bağlarının hidroliziyle molekül ağırlığının azalması ve oluşan düşük molekül ağırlıklı ürünlerin mikroorganizmalar tarafından metabolize edilmesi şeklinde ilerlemektedir. Yüksek sıcaklık ve nem içeren endüstriyel kompostlama koşulları hidrolizi hızlandırırken ortam sıcaklığındaki toprak, tatlı su veya deniz ortamlarında bozunma oldukça yavaş olabilir. Bu nedenle PLA için biyobozunurluk iddiası, geçerli olduğu ortam ve standartla birlikte belirtilmelidir (Boey, Mohamad, Khok, Tay, & Baidurah, 2021).

3.7. Polihidroksialkanoatlar

PHA'lar, çeşitli mikroorganizmalar tarafından karbon ve enerji rezervi olarak hücre içerisinde sentezlenen biyopolyesterlerdir. Polihidroksibütirat ve polihidroksibütirat-ko-hidroksivalerat, bu ailenin en fazla araştırılan üyeleri arasındadır. Monomer bileşiminin değiştirilmesiyle sert, kırılgen veya daha esnek özellikte farklı PHA türleri üretilebilmektedir (Boey et al., 2021).

PHA'lar oksijen ve aroma bariyeri ile biyobozunma potansiyeli bakımından ambalaj uygulamaları için önemli avantajlara sahiptir. Bazı PHA türleri endüstriyel kompostlama dışında toprak ve su gibi ortamlarda da biyolojik olarak parçalanabilmektedir. Bununla birlikte bozunma hızı polimer bileşimine, kristallığe, kalınlığa ve çevresel koşullara bağlıdır.

Yüksek fermantasyon ve saflaştırma maliyeti, üretim ölçeğinin sınırlı olması, dar işleme aralığı ve özellikle polihidroksibütiratın kırılabilirliği PHA'ların yaygın kullanımını kısıtlamaktadır. Ucuz karbon kaynaklarının ve gıda endüstrisi yan ürünlerinin fermantasyonda kullanılması, PHA üretim maliyetini azaltmaya yönelik başlıca araştırma alanlarından biridir.

3.8. PBS, PBAT ve biyobozunur polimer karışımları

PBS, iyi işlenebilirlik, ısı kararlılık ve mekanik özellikleriyle öne çıkan alifatik bir poliesterdir. Süksinik asit ve 1,4-bütandiol monomerleri biyolojik veya fosil kaynaklardan elde edilebildiği için PBS'nin biyobazlı içeriği üretim yoluna bağlıdır. Bununla birlikte polimer omurgasındaki ester bağları PBS'nin uygun koşullarda biyolojik olarak parçalanabilmesine olanak sağlamaktadır.

PBAT ise alifatik ve aromatik birimleri birlikte içeren, esnekliği ve kopma uzaması yüksek biyobozunur bir poliesterdir. Genellikle fosil kaynaklı monomerlerden üretilmesine rağmen biyobozunabilir olması, biyobazlılık ile biyobozunurluğun farklı kavramlar olduğunu gösteren önemli örneklerden biridir. PBAT'nin mekanik dayanımı bazı uygulamalar için sınırlı olduğundan nişasta, PLA veya diğer polimerlerle karıştırılması yaygındır (Roy, Ghosh, Zhang, & Rhim, 2024).

Polimer karışımları, tek bir malzemenin sağlayamadığı mekanik, bariyer ve işleme özelliklerini bir araya getirebilir. Örneğin PLA'nın sertliği PBAT'nin esnekliğiyle, nişastanın düşük maliyeti biyobozunur poliesterin su direnciyle dengelenebilir. Ancak polimerlerin uyumsuzluğu faz ayırma ve mekanik özelliklerin zayıflamasına neden olabilir. Uyumlaştırıcıların ve zincir uzatıcıların kullanılması performansı artırabilmekle birlikte bu katkıların biyobozunma ve gıda ile temas güvenliği üzerindeki etkileri değerlendirilmelidir.

3.9. Tarımsal ve gıda endüstrisi atıklarından üretilen malzemeler

Meyve ve sebze posaları, tahıl kabukları, şeker endüstrisi yan ürünleri, peynir altı suyu, kabuklu deniz ürünü atıkları ve diğer tarımsal artıklar nişasta, selüloz, hemiselüloz, pektin, protein, kitin ve biyoaktif bileşikler bakımından önemli kaynaklardır. Bu bileşenlerin ambalaj malzemesi üretiminde değerlendirilmesi, atık miktarının azaltılmasına ve düşük değerli yan ürünlerin katma değerli ürünlere dönüştürülmesine katkı sağlayabilir (Karakuş & Ayhan, 2019; Xie et al., 2024).

Atıkların doğrudan öğütülerek dolgu maddesi olarak kullanılması mümkün olduğu gibi içerdikleri polimerler ekstraksiyon ve saflaştırma işlemleriyle ayrılarak film matrisine dönüştürülebilir. Atıklardan elde edilen fenolik bileşikler, pigmentler ve uçucu yağlar da ambalajlara antioksidan, antimikrobiyal veya renk değişimine dayalı gösterge özelliği kazandırmak amacıyla kullanılabilir.

Atık temelli üretimin çevresel üstünlüğü kendiliğinden oluşmamaktadır. Hammaddenin toplanması, taşınması, kurutulması, ekstraksiyonu ve saflaştırılması enerji, su ve kimyasal madde tüketebilmektedir. Atık bileşiminin mevsimsel değişimi, mikrobiyal yük, pestisit kalıntıları, ağır metaller ve diğer kirleticiler standart ürün kalitesinin sağlanmasını güçleştirebilir. Bu nedenle atık temelli ambalajların sürdürülebilirliği yaşam döngüsü yaklaşımıyla; güvenliği ise hammadde izlenebilirliği, göç testleri ve toksikolojik değerlendirmelerle incelenmelidir.

Biyobozunur ambalaj malzemelerinin hiçbirisi bütün gıda ambalajlama gereksinimlerini tek başına karşılayan evrensel bir çözüm değildir. Doğal polimerler yenilenebilirlik ve biyolojik parçalanabilirlik bakımından avantajlı olmasına karşın özellikle nem bariyeri ve endüstriyel işlenebilirlik açısından geliştirilmeye

ihtiyaç duymaktadır. PLA, PHA, PBS ve PBAT gibi termoplastikler mevcut üretim yöntemlerine daha kolay uyarlanabilmekte; ancak maliyet, işleme sıcaklığı ve kullanım sonrası altyapı bakımından farklı sınırlılıklar taşımaktadır. Bu nedenle malzeme seçimi yalnızca “biyobozunur” olma niteliğine göre değil; gıdanın korunma gereksinimi, ambalajın kullanım süresi, gıdayla temas güvenliği, üretim teknolojisi ve gerçek kullanım sonrası yönetim koşulları birlikte değerlendirilerek yapılmalıdır.

4. SONUÇ

Bu bölüm, biyobozunur ambalajların geleneksel plastiklere tek ve koşulsuz bir alternatif olarak değil; hammadde kaynağı, polimer yapısı, kullanım performansı, gıdayla temas güvenliği ve kullanım sonrası yönetim koşulları birlikte değerlendirilmesi gereken malzeme sistemleri olarak ele alınması gerektiğini göstermektedir.

Biyobozunur ambalaj tasarımıındaki temel güçlük, kullanım sırasındaki kararlılık ile kullanım sonrasındaki bozunabilirlik arasında denge kurmaktır. Doğal polimerler yenilenebilirlik ve film oluşturma bakımından avantaj sağlarken çoğu zaman nem duyarlılığı ve endüstriyel işlenebilirlik açısından geliştirmeye ihtiyaç duyar. PLA, PHA, PBS ve PBAT gibi termoplastikler mevcut üretim süreçlerine daha kolay uyarlanabilse de maliyet, ısı özellikler, mekanik performans ve bozunma koşulları bakımından farklı sınırlılıklar taşır.

Gelecekteki çalışmaların laboratuvar ölçeğindeki film üretiminin ötesine geçerek endüstriyel işlenebilirlik, uzun süreli depolama kararlılığı, migrasyon davranışı, standartlaştırılmış biyobozunma testleri ve gerçek kullanım sonrası koşullara odaklanması gerekmektedir. Ayrıca biyoplastikler ve plastik atıklar konusundaki kullanıcı farkındalığı, doğru etiketleme ve

uygun atık akışlarına yönlendirme, sürdürülebilir malzeme dönüşümünün toplumsal boyutunu oluşturmaktadır (Boca, Işıtan, Çağlarer, & Saraçlı, 2023; Işıtan et al., 2022).

KAYNAKÇA

- Boca, G. D., Işıtan, A., Çağlar, E., & Saraçlı, S. (2023). A cross-cultural analysis for plastic waste perception of students from Romania and Turkey. *Sustainability*, 15(24), 16594. doi:10.3390/su152416594
- Boey, J. Y., Mohamad, L., Khok, Y. S., Tay, G. S., & Baidurah, S. (2021). A review of the applications and biodegradation of polyhydroxyalkanoates and poly(lactic acid) and its composites. *Polymers*, 13(10), 1544. doi:10.3390/polym13101544
- Cazón, P., & Vázquez, M. (2021). Bacterial cellulose as a biodegradable food packaging material: A review. *Food Hydrocolloids*, 113, 106530. doi:10.1016/j.foodhyd.2020.106530
- Cheng, H., Chen, L., McClements, D. J., Yang, T., Zhang, Z., Ren, F., ... Jin, Z. (2021). Starch-based biodegradable packaging materials: A review of their preparation, characterization and diverse applications in the food industry. *Trends in Food Science & Technology*, 114, 70–82. doi:10.1016/j.tifs.2021.05.017
- Gök, C., Işıtan, A., Bersani, M., Bettotti, P., Pasquardini, L., Fedrizzi, M., ... Koluman, A. (2025). Physicochemical and antimicrobial evaluation of bacterial cellulose derived from spent tea waste. *Polymers*, 17(18), 2521. doi:10.3390/polym17182521
- International Organization for Standardization. (2012). ISO 14855-1:2012: Determination of the ultimate aerobic biodegradability of plastic materials under controlled composting conditions—Method by analysis of evolved carbon dioxide—Part 1: General method. Geneva, Switzerland: Author.

- International Organization for Standardization. (2019). ISO 17556:2019: Plastics—Determination of the ultimate aerobic biodegradability of plastic materials in soil by measuring the oxygen demand in a respirometer or the amount of carbon dioxide evolved. Geneva, Switzerland: Author.
- International Organization for Standardization. (2021). ISO 17088:2021: Plastics—Organic recycling—Specifications for compostable plastics. Geneva, Switzerland: Author.
- Işıtan, A., Gök, C., Sulak, M., Kırmızı, F., Onar, V., & Kutlubay, R. Ç. (2022). Bioplastics/biopolymers: How aware are we? *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 37, 36–41. doi:10.31590/ejosat.1129490
- Işıtan, A., Pasquardini, L., Bersani, M., Gök, C., Fioravanti, S., Lunelli, L., ... Koluman, A. (2025). Sustainable production of microcrystalline and nanocrystalline cellulose from textile waste using HCl and NaOH/urea treatment. *Polymers*, 17(1), 48. doi:10.3390/polym17010048
- Karakuş, E., & Ayhan, Z. (2019). Gıda atıklarından çevre dostu biyobozunur ambalaj malzemesi üretimi. *Gıda*, 44(6), 1008–1019. doi:10.15237/gida.GD19102
- Kılınç, M., Tomar, O., & Çağlar, A. (2017). Biyobozunur gıda ambalaj malzemeleri. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 17(3), 988–996. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/akufemubid/article/535316>
- Kim, J. R., Thelusmond, J.-R., Albright, V. C., III, & Chai, Y. (2023). Exploring structure-activity relationships for polymer biodegradability by microorganisms. *Science of*

the Total Environment, 890, 164338.
doi:10.1016/j.scitotenv.2023.164338

Kumari, S. V. G., Pakshirajan, K., & Pugazhenth, G. (2022). Recent advances and future prospects of cellulose, starch, chitosan, polylactic acid and polyhydroxyalkanoates for sustainable food packaging applications. *International Journal of Biological Macromolecules*, 221, 163–182. doi:10.1016/j.ijbiomac.2022.08.203

Nilsen-Nygaard, J., Noriega Fernández, E., Radusin, T., Rotabakk, B. T., Sarfraz, J., Sharmin, N., ... Pettersen, M. K. (2021). Current status of biobased and biodegradable food packaging materials: Impact on food quality and effect of innovative processing technologies. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 20(2), 1333–1380. doi:10.1111/1541-4337.12715

Nizamuddin, S., & Chen, C. (2024). Biobased, biodegradable and compostable plastics: Chemical nature, biodegradation pathways and environmental strategy. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(6), 8387–8399. doi:10.1007/s11356-023-31689-w

Parreidt, T. S., Müller, K., & Schmid, M. (2018). Alginate-based edible films and coatings for food packaging applications. *Foods*, 7(10), 170. doi:10.3390/foods7100170

Priyadarshi, R., & Rhim, J.-W. (2020). Chitosan-based biodegradable functional films for food packaging applications. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 62, 102346. doi:10.1016/j.ifset.2020.102346

Roy, S., Ghosh, T., Zhang, W., & Rhim, J.-W. (2024). Recent progress in PBAT-based films and food packaging

applications: A mini-review. *Food Chemistry*, 437, 137822. doi:10.1016/j.foodchem.2023.137822

Shaikh, S., Yaqoob, M., & Aggarwal, P. (2021). An overview of biodegradable packaging in food industry. *Current Research in Food Science*, 4, 503–520. doi:10.1016/j.crfs.2021.07.005

Swetha, T. A., Bora, A., Mohanrasu, K., Balaji, P., Raja, R., Ponnuchamy, K., ... Arun, A. (2023). A comprehensive review on polylactic acid (PLA)—Synthesis, processing and application in food packaging. *International Journal of Biological Macromolecules*, 234, 123715. doi:10.1016/j.ijbiomac.2023.123715

Xie, D., Ma, H., Xie, Q., Guo, J., Liu, G., Zhang, B., ... Yin, J. (2024). Developing active and intelligent biodegradable packaging from food waste and byproducts: A review of sources, properties, film production methods, and their application in food preservation. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 23(3), e13334. doi:10.1111/1541-4337.13334

Zhang, R., Liu, R., Han, J., Ren, L., & Jiang, L. (2024). Protein-based packaging films in food: Developments, applications, and challenges. *Gels*, 10(7), 418. doi:10.3390/gels10070418

GIDA KAYIP VE ATIKLARININ AZALTILMASINDA DİJİTAL TEKNOLOJİLER

Aysel İÇÖZ¹

1. GİRİŞ

Gıda kayıp ve atıkları, kaynak kullanımı, çevresel sürdürülebilirlik ve gıda güvencesi açısından küresel gıda sistemlerinin karşı karşıya olduğu önemli sorunlardan biridir. Hızlı nüfus artışı, artan gıda tüketimi ve sınırlı gıda kaynakları arasındaki dengesizlik, küresel gıda sistemleri üzerindeki baskıyı giderek artırmaktadır (Pawar vd., 2023). Bu durum, ekonomik kayıplar, ekolojik bozulma ve sosyal eşitsizlik gibi birbiriyle ilişkili sorunları daha da belirgin hâle getirmekte ve sürdürülemez gıda tüketim modellerinin dönüştürülmesini gerekli kılmaktadır (Kujala ve Koppelmäki, 2024). Gıda kaybı ve israfının miktarı ülkeler arasında gelir düzeyi, kentleşme ve ekonomik büyümeden etkilenecek değişiklik göstermektedir (Chalak vd., 2016).

Gıda kayıp ve atıklarının nicel olarak belirlenmesi, önleme politikalarının geliştirilmesi ve müdahalelerin sonuçlarının izlenmesi için gereklidir. Ölçümler, atık akışlarındaki değişimin değerlendirilmesine olanak sağlasa da yöntemsel farklılıklar ve güvenilir veri eksikliği, sonuçların karşılaştırılmasını güçleştirmektedir (Thyberg vd., 2015; Parfitt vd., 2010). Bu nedenle etkin yönetim, kayıplara neden olan süreçlerin izlenmesini ve verilerin karar süreçlerinde kullanılmasını gerektirmektedir. Hane düzeyindeki geleneksel ölçüm yöntemlerinde atığın kaynağının belirlenmesi ve nesnellik

¹ Öğr. Gör. Dr. Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Gıda Teknolojisi Programı, ORCID:0000-0003-1445-2908.

bakımından sınırlılıklar bulunmaktadır (Elimelech vd., 2018). Nesnelerin İnterneti (IoT) ve büyük veri teknolojileri, gıda tedarik zincirinin farklı aşamalarındaki bilgi eksikliklerini azaltmaya ve verilerin değerlendirilmesine katkı sağlayabilecek araçlar sunmaktadır (Ahmadzadeh vd., 2023). Yapay zekâ destekli sistemlerin genel atık yönetiminde izleme, tahmin ve kaynak kullanımının optimizasyonuna yönelik uygulama potansiyeli de bulunmaktadır (Olawade vd., 2024).

Gıda israfına yönelik araştırmalar; evsel gıda atıkları, yönetim stratejileri, sürdürülebilir uygulamalar, ölçüm yöntemleri ve tedarik zincirinin farklı aşamalarındaki azaltma yaklaşımları gibi çeşitli konuları ele almaktadır (Elimelech vd., 2018; Zrnić vd., 2023). Gıda kayıp ve atıklarının çok aşamalı yapısı, geleneksel azaltma yöntemlerinin yanı sıra üretimden tüketime kadar farklı süreçlerden elde edilen verileri değerlendirebilen teknolojik yaklaşımların da önemini ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, sektörler arası yapay zekâ entegrasyonunun gıda israfının azaltılması ve küresel gıda güvensizliğiyle mücadelede önemli bir potansiyel taşıdığı belirtilmektedir (Prasad vd., 2026).

Bu bölümde, gıda kayıp ve atıklarının kapsamı ve temel nedenleri ele alınarak, yapay zekâ ve dijital teknolojilerin tedarik zincirinin farklı aşamalarındaki uygulamaları incelenmektedir. Ayrıca bu teknolojilerin gıda kayıp ve atıklarının azaltılmasına yönelik potansiyel katkıları ve uygulamada karşılaşılan sınırlılıklar değerlendirilmektedir.

2. GIDA KAYIP VE ATIKLARININ KAPSAMI

Gıda israfı, insan tüketimi amacıyla üretilen gıdaların hayvan yemi olarak değerlendirilmesi veya yenilebilir durumdaki gıdaların atılması gibi uygun olmayan kullanım biçimlerini

kapsamaktadır (Yusoff vd., 2024). Literatürde bu olgu, hasat edilmemiş ürünlerden hanelerde ve perakende sektöründe tüketilmeden kalan ürünlere kadar uzanan gıda kaybı ile taşıma sırasında bozulan, perakende veya catering işletmelerine ulaşamayan ya da amaçlandığı şekilde tüketilmeyen çiğ veya işlenmiş gıdaları içeren gıda atığı kavramları çerçevesinde ele alınmaktadır (Alexander vd., 2013; Bilska vd., 2015). Özellikle gelişmekte olan ülkelerde hasat, işleme, depolama ve dağıtım için gerekli altyapının yetersiz olması, tedarik zinciri boyunca gıda kayıplarının artmasına katkıda bulunmaktadır (Gustavsson vd., 2013).

United Nations Environment Programme (UNEP, 2024) verilerine göre, 2022 yılında dünya genelinde hane, gıda hizmetleri ve perakende sektörlerinde yaklaşık 1,05 milyar ton gıda atığı oluşmuş ve bu miktar kişi başına yıllık ortalama 132 kg'a karşılık gelmiştir. Atıkların %60'ı hanelerden, %28'i gıda hizmetleri sektöründen ve %12'si perakende sektöründen kaynaklanmıştır (UNEP, 2024).

Gelişmekte olan ülkelerde, yetersiz uygulamalar ve altyapı eksiklikleri nedeniyle küresel gıda kaybının yaklaşık %44'ünün hasat sonrası ve işleme aşamalarında meydana geldiği belirtilmektedir (Sakaguchi vd., 2018; Okumus vd., 2020). Buna karşılık, küresel gıda israfının %56'sından sorumlu olduğu belirtilen gelişmiş ülkelerde, israfın yaklaşık %40'ı tüketici düzeyinde gerçekleşmektedir. Tüketici alışkanlıkları, tarih etiketlerinin yanlış anlaşılması ve uygun olmayan gıda işleme uygulamalarının yanı sıra, artıkları değerlendirmeye yönelik geleneksel mutfak bilgisinin azalmasının da gıda israfına katkıda bulunduğu bildirilmektedir (Karunasena vd., 2021; Quintero-Angel vd., 2022).

Gıdanın tüketilmeden kaybedilmesi, ürünün yanı sıra üretiminde kullanılan toprak, su ve enerji gibi kaynakların da

etkin değerlendirilememesi anlamına gelmektedir (Bhatia vd., 2023; Wunderlich ve Martinez, 2018; Kibler vd., 2018). Bu durum ekonomik maliyetler de doğurduğundan gıda israfıyla mücadele, çevresel ve ekonomik sürdürülebilirlik açısından birlikte ele alınmalıdır (Wunderlich ve Martinez, 2018; Baig vd., 2019). Özellikle hane düzeyinde oluşan gıda atıkları, çevresel maliyetlerin ve ekonomik değerin gıda değer zinciri boyunca birikmesi nedeniyle önemli toplumsal sonuçlar doğurmaktadır (Roodhuyzen vd., 2017). Ayrıca, israf edilen gıdanın açlık ve yetersiz beslenmeyle mücadelede değerlendirilebilme potansiyeli, sorunun sosyal boyutunu daha da önemli hâle getirmektedir (Hasegawa vd., 2019).

3. GIDA ATIKLARININ OLUŞUM NEDENLERİ

3.1. Üretim, İşleme, Perakende ve Dağıtım Süreçleri

Gıda işleme endüstrileri, bozulabilir tarım ürünlerinin raf ömrünün uzatılması ve ticari değerinin artırılmasında önemli bir rol oynamakla birlikte, elleçleme, hasat, işleme, paketlenme ve dağıtım aşamalarında gıda kayıp ve atıkları ortaya çıkabilmektedir (Sagar vd., 2018; Sharma vd., 2022).

Tarımsal üretim ve hasat aşamalarındaki gıda kayıpları; teknik yetersizlikler, ekonomik koşullar, uygun olmayan hasat yöntemleri ve altyapı eksiklikleriyle ilişkili olabilmektedir. Özellikle hasat zamanlaması, düşük mekanizasyon düzeyi, iş gücü yetersizliği ve düşük performanslı ekipmanlar, kayıp miktarını etkileyen önemli faktörler arasındadır (Grover ve Singh, 2013; Kumar ve Kalita, 2017).

Ekonomik koşullar da üreticilerin hasat kararlarını etkileyebilmekte; piyasa talebinin düşük olduğu ve hasattan elde edilecek gelirin hasat ve nakliye maliyetlerini karşılamadığı durumlarda ürünler tarlada bırakılabilmektedir (Food and

Agriculture Organization of the United Nations [FAO], 2014). Ayrıca çiftçiler, zararlılar, olumsuz hava koşulları ve piyasa belirsizliklerinden kaynaklanabilecek kayıplara karşı önlem almak veya sözleşme yükümlülüklerini karşılamak amacıyla ihtiyaçtan fazla üretim yapabilmektedir. Ancak bu durumun yol açtığı arz fazlası, piyasa fiyatlarının düşmesine ve bazı ürünlerin hasat edilmeden bırakılmasına neden olabilmektedir (Beretta vd., 2013; Garrone vd., 2014; Gustavsson vd., 2011; Kaipia vd., 2013).

Ticari kalite standartları, tarımsal ürünlerin değerlendirilmesini etkilemekte; şekil, boyut, renk ve ağırlık bakımından gıda işleme işletmelerinin veya hedef pazarların belirlediği standartları karşılamayan bazı ürünler, tüketilebilir durumda olmalarına rağmen hasat edilmemekte ya da hasattan hemen sonra atılmaktadır (Garrone vd., 2014; Papargyropoulou vd., 2014; Stuart, 2009). Gıda ürünlerinin hasat sonrasında yüklenmesi, boşaltılması, taşınması, aktarılması ve depolamaya hazırlanmasını kapsayan elleçleme süreçlerindeki kayıplar, ürünlerin türüne ve özelliklerine göre farklılık gösterebilmektedir (Gustavsson vd., 2011). İşleme ve paketleme aşamalarında ise teknik verimsizlikler, ekipman arızaları, yetersiz hat kapasitesi ve uygun olmayan işleme yöntemleri gıda kayıplarına yol açabilmektedir (Beretta vd., 2013; Murthy vd., 2009).

Gıda bilimi ve teknolojisindeki gelişmeler, daha verimli tarım yöntemlerine, üretim süreçlerinin iyileştirilmesine ve uluslararası gıda ticaretinin gelişmesine katkı sağlayabilmektedir (Pawlak ve Kołodziejczak, 2020). Gıda ve içecek sektöründe çevresel performansı iyileştirmek ve sürdürülebilir tedarik uygulamalarını geliştirmek amacıyla açık inovasyon stratejilerine yönelim artmaktadır. Ancak bu girişimler, tedarik zincirinde yetiştirme ve hasattan ayıklama, işleme, taşıma ve depolamaya kadar farklı aşamalarda oluşan organik atıkları tamamen önlemek

için tek başına yeterli olmayabilmektedir (Giroto ve Beggio, 2025).

3.2. Hane Düzeyi, Tüketici Davranışları ve Gıda Hizmetleri

Tüketici kaynaklı gıda atıklarının oluşumunda aşırı satın alma, bozulabilir gıdaların uygun koşullarda saklanmaması, büyük porsiyonların hazırlanması, gıdanın tazeliğine ilişkin belirsizlikler ve yenilebilir kısımların atılması gibi çeşitli uygulamalar etkili olabilmektedir (Jain vd., 2018). Bunun yanı sıra, yetersiz planlama ve “son kullanma tarihi” ile “tavsiye edilen tüketim tarihi” gibi tarih etiketlerinin yanlış yorumlanması da gıda atığı oluşumuyla ilişkilendirilmektedir (Stancu vd., 2016; Silva vd., 2023). Bu nedenle tüketici alışkanlıklarının anlaşılması, atık azaltma müdahalelerinin tasarlanmasında önem taşımaktadır (Di Talia vd., 2019; González-Santana vd., 2022).

Gıda israfına ilişkin tüketici tutumları, hanelerin yanı sıra restoranlar gibi tüketim ortamlarında da önem taşımaktadır (Handayanto vd., 2025). Dikkatsizlik ve ihmalkârlık gibi davranışsal etkenlerin hane kaynaklı atıklarla ilişkili olduğu bildirilmektedir (Li vd., 2024; Mayanti, 2024). Bu etkenlerin anlaşılması, tüketim aşamasında önleyici stratejilerin geliştirilmesine katkı sağlayabilir (Stangherlin ve De Barcellos, 2018). Tüketici uygulamalarının kaynak kullanımı ve çevresel etkilerle ilişkisi, davranış değişikliğine yönelik yaklaşımların önemini artırmaktadır (Han vd., 2025). Bu doğrultuda, tasarım temelli müdahalelerin sürdürülebilir gıda tüketimini destekleyen tüketici davranışlarının geliştirilmesinde potansiyel taşıdığı belirtilmektedir (Schmidt vd., 2022).

Restoranlar ve kurumsal gıda hizmetleri, gıda atıklarının oluştuğu önemli tüketim alanları arasında yer almaktadır. Hastaneler, okul kantinleri, üniversiteler ve havaalanları gibi kurumsal ortamlarda katı menü planlaması, talep tahminindeki

yetersizlikler ve operasyonel kısıtlamalar organik atık oluşumuna katkıda bulunabilmektedir. Bu nedenle söz konusu ortamların yapay zekâ destekli çözümlerden yararlanma potansiyeli bulunmaktadır (Giroto ve Beggio, 2025). Özellikle üniversite yemekhaneleri, yüksek hacimli ve değişken tüketim yapısına sahip olmalarına rağmen ayrıntılı atık izleme sistemlerinin sınırlı olabildiği alanlar olarak öne çıkmaktadır (Faezirad vd., 2021; Leal Filho vd., 2024). Bu ortamlarda ölçeklenebilir ve akıllı izleme araçlarının kullanılması, tüketim kalıplarının anlaşılmasına ve verimsizliklerin belirlenmesine katkı sağlayabilir (Ahmadzadeh vd., 2023). Catering alanında oluşan gıda atıklarının toplam gıda atığının yaklaşık %12'sini oluşturduğu, buna karşın konunun akademik literatürde görece sınırlı biçimde ele alındığı bildirilmektedir (Eriksson vd., 2017; Tomaszewska vd., 2021; Wu vd., 2021; Tang vd., 2023).

Restoran ve konaklama sektörlerinde gıda atıklarının azaltılması; yönetim uygulamaları, personel eğitimi ve tüketici davranışlarına yönelik müdahaleler gibi farklı stratejileri gerektirmektedir (Filimonau ve Delysia, 2019; Coşkun ve Özbük, 2020; Ng ve Sia, 2023). Restoranlardaki gıda atığı oluşumu, hammadde tedarikinden hazırlama ve tüketime kadar uzanan malzeme akışıyla ilişkilidir. Bu süreçte hammaddelerin etkin kullanılması, üretimin gerçek talebe göre planlanması, kalan malzemelerin uygun biçimde depolanması ve yeniden değerlendirilmesi atıkların azaltılması açısından önem taşımaktadır. Pişirme süreçlerinin iyileştirilmesi, sunumların sadeleştirilmesi ve hammaddenin daha fazla bölümünden yararlanılmasını sağlayan yemek seçeneklerinin geliştirilmesi de uygulanabilecek yaklaşımlar arasındadır (Spang vd., 2019). Gıda hazırlama aşamasında oluşan atıkların azaltılmasında operasyonel planlama önem taşımaktadır (Sustainable Restaurant Association [SRA], 2010). Bu kapsamda merkezi mutfak sistemleri, özellikle zincir restoranlarda malzeme tedarikinin

düzenlenmesi ve gıda atıklarının azaltılması açısından bir yaklaşım olarak değerlendirilmektedir (Gao vd., 2021). Merkezi mutfaklarda restoranların ihtiyaçlarına göre hazırlanan yarı mamullerin kullanılması ve teslimatların gerçek talebe göre planlanması, restoranların gereksinim duyduğu miktarda ürüne zamanında erişmesini sağlayarak fazla stok oluşumunun sınırlandırılmasına katkıda bulunabilir (Gao vd., 2021). Bunun yanı sıra, tüketici sayısına göre farklı porsiyon seçeneklerinin sunulması ve sabit menüler yerine daha esnek menü seçeneklerinin kullanılması da gıda atıklarının azaltılmasına yönelik uygulamalar arasında değerlendirilmektedir (Heikkilä vd., 2016).

4. YAPAY ZEKÂ VE DİJİTAL İZLEME YAKLAŞIMLARI

Gıda kayıp ve atıklarının azaltılmasında süreç verimsizliklerinin ve iyileştirme alanlarının belirlenmesi önem taşımaktadır. Değer Akışı Haritalaması (Value Stream Mapping–VSM) ve Pareto prensibi gibi geleneksel yalın üretim araçları, israfa katkıda bulunan temel faktörlerin belirlenmesinde kullanılmaktadır (Samuel vd., 2019). Özellikle VSM, gıda tedarik zincirlerindeki kayıp ve atıkların belirlenmesi ve azaltılmasına yönelik kullanılan araçlardan biridir (De Steur vd., 2016). Yapay zekâ (YZ), bu araçları veri analizi ve tahmin yetenekleriyle tamamlayarak talep tahmini, stok yönetimi, atık izleme ve fazla gıdanın yeniden dağıtımı gibi alanlarda kullanılabilir. Genel atık yönetimi literatüründe, gerçek zamanlı izleme ve tahmine dayalı analizlerin atık oluşum örüntülerinin belirlenmesine ve kaynak tahsisine katkı sağlayabileceği belirtilmektedir (Olawade vd., 2024). Gıda üretim sistemlerinin dijitalleştirilmesi, üretim verilerinin izlenmesi ve analiz edilmesi yoluyla süreç verimliliğinin, kaynak kullanımının ve

sürdürülebilirliğin iyileştirilmesine katkı sağlayabilmektedir. Bununla birlikte, dijital dönüşümün uygulanması teknolojik altyapı, yatırım gereksinimleri ve organizasyonel kapasite açısından çeşitli zorlukları da beraberinde getirebilmektedir (Giroto vd., 2022).

Gıda israfının azaltılmasında gıda bozulması tahmini ve envanter yönetimini destekleyen makine öğrenmesi modellerinin seçimi; verinin niteliğine, ortamın karmaşıklığına ve gıda sisteminin hedeflerine bağlıdır (Ciccullo vd., 2021). Makine öğrenmesi, atık oluşumu, arıtma ve geri dönüşüm süreçlerinin tahmininde de kullanılmaktadır. Organik atık çalışmalarında Yapay Sinir Ağları (YSA), Destek Vektör Makineleri (SVM), Genetik Algoritmalar ve Karar Ağacı/Rastgele Orman yöntemlerinin kullanıldığı bildirilmektedir (Guo vd., 2021). Rastgele Orman, SVM ve Yapay Sinir Ağları gibi denetimli öğrenme modelleri; sıcaklık, nem ve mikrobiyolojik koşullar gibi değişkenlerden yararlanarak bozulma örüntülerinin tahmin edilmesinde kullanılabilmektedir. Rastgele Orman, heterojen veri kümelerini yönetebilme özelliğiyle öne çıkmaktadır (Wager ve Athey, 2018). SVM modelleri, taze ve bozulmuş gıdaların ikili sınıflandırılması gibi görevlerde kullanılabilmekle birlikte büyük ölçekli uygulamalarda hesaplama yükü oluşturabilir (Dudzik vd., 2021). Gıda tanıma uygulamalarında SVM kullanımı da incelenmiştir (Pouladzadeh vd., 2015).

Yapay sinir ağları ve özellikle derin öğrenme ağları, hiperspektral görüntüleme gibi karmaşık veri kümelerinden bozulma göstergelerinin belirlenmesinde kullanılabilmektedir. Ancak bu yaklaşımlar daha yüksek hesaplama maliyeti ve veri gereksinimi doğurabilmektedir (Gul vd., 2024; Kang vd., 2022). CNN ve RNN gibi derin öğrenme modelleri ise görüntü ve zaman serisi verilerinin analizinde kullanılmaktadır. CNN'ler, hiperspektral görüntüleme yardımıyla taze ürünlerde mikrobiyal

kontaminasyonun belirlenmesi gibi görsel kalite değerlendirmelerinde bozulmanın erken tespitini destekleyebilmektedir (Soni vd., 2022). Takviyeli öğrenme yaklaşımları da envanter yönetiminin optimizasyonunda kullanılabilmektedir. Derin Q-Ağları gibi takviyeli öğrenme modelleri, bozulma riskleri ve talep dalgalanmalarına göre sipariş modellerinin ayarlanmasına olanak sağlamaktadır (Jullien vd., 2022; Selukar vd., 2022). Bununla birlikte, bu modeller önemli eğitim süresi ve sürekli gerçek dünya geri bildirimi gerektirebilir.

Nesnelerin İnterneti (Internet of Things–IoT) tabanlı sensörler, çevresel koşulların ve gıda kalitesiyle ilişkili parametrelerin sürekli izlenmesine olanak sağlamaktadır. Sıcaklık, nem ve taşıma süresi gibi bozulma açısından önemli değişkenlerden elde edilen gerçek zamanlı veriler, yapay zekâ algoritmalarına aktarılabilmekte ve böylece gıda kalitesindeki değişimlerin izlenmesi ile bozulma tahminlerinin desteklenmesi mümkün olabilmektedir (Pachiappan vd., 2024). Yapay zekâ modellerinin IoT sensörleriyle bütünleştirilmesi, gerçek zamanlı izleme ve depolama koşullarının uyarlanabilir kontrolünü desteklemektedir. LSTM ile IoT tabanlı sıcaklık sensörlerinin birleştirilmesi, çevresel değişikliklerin bozulma tahminlerine aktarılmasını sağlayabilmektedir (Ikram vd., 2019). IoT tabanlı sistemlerden elde edilen verilerin tedarik zinciri boyunca izlenebilirliği ve güvenilir biçimde yönetilmesi önem taşımaktadır. Bu kapsamda blok zinciri teknolojisi, gıda tedarik zincirinde şeffaflığı ve izlenebilirliği artırarak ürünlerin takip edilmesini ve bozulma risklerine karşı zamanında müdahale edilmesini destekleyebilmektedir (Duan vd., 2024). Sıcaklık dalgalanmaları, nem düzeyleri ve transit süreleri gibi değişkenlerin daha güvenilir biçimde izlenmesi, yapay zekâ sistemlerinin kullandığı verilerin niteliğini destekleyebilir (Pachiappan vd., 2024). Tedarik zinciri boyunca veri bütünlüğü ve kullanılabilirliğinin korunması, bozulma risklerinin ve

zafiyetlerin daha erken belirlenmesine katkı sağlayabilir. Böylece yapay zekâ modelleri, özellikle bozulabilir ürünlerde aşırı stoklama veya yanlış kullanım riskini azaltmaya yönelik kararları destekleyebilir (Sonwani vd., 2022). Bununla birlikte, blok zincirinin güvenli veri yönetimi ve hesap verebilirlik bakımından sunduğu olanaklar, gıda güvenliği ve daha dayanıklı tedarik zincirleri bağlamında da tartışılmaktadır (Shiraishi vd., 2025).

5. DİJİTAL TEKNOLOJİLERİN UYGULAMA ALANLARI

Gıda işleme süreçlerinde yapay zekâ destekli ayıklama ve sınıflandırma teknolojileri, süreçlerin daha etkin kontrol edilmesini sağlayarak mevcut hammaddelerin daha verimli kullanılmasına ve üretimde kalite, verim ve üretkenliğin geliştirilmesine katkı sağlayabilmektedir (Jamali ve Misman, 2021). Gıda kayıp ve atıklarının azaltılmasında üretim süreçlerinin yanı sıra talep tahmini ve stok yönetimi de önem taşımaktadır. Talebin doğru tahmin edilememesi, ticari gıda israfına katkıda bulunan faktörlerden biridir. Yapay zekâ destekli tahmin yöntemleri, tüketicilerden mağazalara, dağıtım merkezlerinden üretici ve hammadde tedarikçilerine kadar tedarik zincirinin farklı aşamalarında talep ve arzın daha etkin yönetilmesini destekleyebilmektedir. Paket boyutu, özel etkinliklere bağlı tüketim değişimleri, mağaza stok gereksinimleri, ürün teşhiri ve güvenlik stokları gibi faktörlerin tahmin süreçlerinde dikkate alınması, tedarik zincirindeki planlama ve stok kararlarının geliştirilmesine katkı sağlayabilmektedir (Gružauskas vd., 2019).

Perakendede yapay zekâ destekli sistemler, satış geçmişi ile hava koşulları ve mevsimsellik gibi değişkenleri birlikte değerlendirerek talep tahminini destekleyebilir (Ciccullo vd., 2022; Onyeaka vd., 2025). Bu tahminlerin stok ve sipariş

kararlarında kullanılması, özellikle raf ömrü sınırlı ürünlerde fazla stok oluşumunun sınırlandırılmasına yardımcı olabilir.

Yapay zekâ destekli sistemler, fazla gıdanın belirlenmesi ve yeniden dağıtımının desteklenmesi amacıyla kullanılabilmektedir. Bu sistemler, gıda bağışçılarının gıda bankaları ve diğer yardım kuruluşlarıyla eşleştirilmesini destekleyerek kullanılabilir durumdaki ürünlerin atık hâline gelmeden değerlendirilmesine katkı sağlayabilmektedir (Onyeaka vd., 2023).

Gerçek zamanlı atık izleme sistemleri, sensör ve kamera verilerini analiz ederek gıdanın hangi süreçlerde gereğinden fazla kullanıldığının veya hazırlandığının belirlenmesini destekleyebilir. Böylece personelin zamanında müdahale etmesine olanak sağlayabilir (Maiyar vd., 2023). Bu sistemlerden elde edilen analiz ve raporlar, yalnızca operasyonel kararların desteklenmesinde değil, çalışan eğitiminde de kullanılabilmektedir. Atık oluşumuna ilişkin verilerin eğitim programlarına dâhil edilmesi, çalışanların gıda israfının azaltılması, uygun atık yönetimi ve geri dönüşüm uygulamalarındaki rollerini daha iyi anlamalarına katkı sağlayabilmektedir (Gajić vd., 2024; Liu vd., 2023).

Yapay zekâ destekli atık yönetiminin ekonomik boyutu da işletmeler açısından önem taşımaktadır. Atık miktarının azaltılması ve geri dönüşüm süreçlerinin optimize edilmesi, atık yönetimi maliyetlerinin azaltılmasına ve işletme performansının geliştirilmesine katkı sağlayabilmektedir. Ayrıca çevresel performansın ve çevre standartlarına uyumun geliştirilmesinin, otel ve restoranların kurumsal imajını destekleyebileceği ve çevre bilincine sahip müşteriler açısından olumlu bir unsur oluşturabileceği belirtilmektedir (Onyeaka vd., 2023).

“Sıfır Atık” yaklaşımı, atık oluşumunun en aza indirilmesini destekleyen yaşam tarzı ve uygulama

değişikliklerini teşvik etmektedir (Bogusz vd., 2021). Bu yaklaşım doğrultusunda yapay zekâ teknolojileri; atıkların toplanması, sınıflandırılması, geri dönüştürülmesi ve izlenmesi gibi süreçlerin geliştirilmesinin yanı sıra kaynak kullanımının optimize edilmesi ve daha verimli atık yönetimi uygulamalarının desteklenmesi amacıyla kullanılabilmektedir (Olawade vd., 2024).

6. UYGULAMA SINIRLILIKLARI VE SEKTÖRLER ARASI İŞ BİRLİĞİ

Yapay zekâ (YZ) uygulamalarının farklı işletmelere yaygınlaştırılması, dijital altyapı ve finansal kapasitenin yanı sıra veri yönetimi, etik ilkeler ve kurumsal hazırlığın birlikte ele alınmasını gerektirmektedir (Giroto ve Beggio, 2025). Yapay zekânın atık yönetimine entegrasyonu çeşitli faydalar sunmakla birlikte teknik, ekonomik ve yönetsel sınırlılıklarla karşılaşmaktadır (Sharma vd., 2022). Bu sınırlılıklar arasında güvenilir veriye erişim, veri kalitesi, gizlilik ve güvenlik, uygulama maliyetleri, altyapı gereksinimleri ve etik hususlar bulunmaktadır (de Sousa vd., 2019). Özellikle sensörlerden ve gerçek zamanlı izleme sistemlerinden elde edilen verilerin kalitesindeki sorunlar, gıda israfının azaltılmasına yönelik uygulamaların performansını etkileyebilmektedir. Kurulum, bakım ve hesaplama maliyetleri küçük işletmeler açısından önemli kısıtlar oluştururken teknolojik karmaşıklık, uygun model seçimi ve olası istihdam etkileri de dikkate alınması gereken unsurlardır (Onyeaka vd., 2025).

Gıda tedarik zincirinde blok zinciri, yapay zekâ ve Nesnelerin İnterneti (IoT) gibi dijital teknolojilerin geniş ölçekte entegrasyonu, birlikte çalışabilirlik ve yönetim açısından çeşitli zorluklar ortaya çıkarmaktadır. Özellikle sistemler arası uyumluluk, ölçeklenebilirlik ve veri doğruluğunun sağlanması,

blok zinciri uygulamalarının yaygınlaştırılmasında ele alınması gereken konulardır. Bu kapsamda birlikte çalışabilirlik standartlarının ve açık politika çerçevelerinin geliştirilmesi, hükümetler, düzenleyici kurumlar ve tedarik zinciri paydaşları arasındaki iş birliğini gerektirmektedir (Shiraishi vd., 2025).

Gıda tedarik zincirinde yapay zekânın etkin kullanımı, tarımsal üretim, işleme, dağıtım, perakende ve tüketim aşamaları arasındaki bağlantıların dikkate alınmasını gerektirmektedir. Bu aşamalar arasındaki çift yönlü bilgi ve geri bildirim akışları, gıda kayıp ve atıklarının azaltılmasına yönelik kararları tedarik zinciri genelinde destekleyebilir. Dijital teknolojilerin entegrasyonunda koordinasyon, şeffaflık ve adil teknoloji erişimi önem taşımaktadır (Prasad vd., 2026). Atık yönetimi kuruluşları, teknoloji sağlayıcıları, araştırmacılar ve politika yapıcılar arasındaki iş birliği de sorumlu uygulamaların geliştirilmesine katkı sağlayabilir (Abdullah vd., 2019; Oyedotun ve Moonsammy, 2021).

Gıda atıklarının azaltılmasında tüketici davranışlarına yönelik müdahalelerin bilgi sağlama, altyapı, ekonomik teşvikler, düzenlemeler ve gıda sistemlerinin tasarımı gibi unsurları birlikte ele alması önem taşımaktadır. Bu kapsamda yemek planlamasının desteklenmesi, uygun ambalajlama uygulamalarının geliştirilmesi, tarih etiketlerinin daha anlaşılır hâle getirilmesi ve tüketicilerin gıda artıkları ile tarih etiketleri konusunda bilinçlendirilmesi gıda atıklarının azaltılmasına katkı sağlayabilir. Ayrıca döngüsel ekonomi ilkeleri, gıda eğitimi ve dijital ticaret uygulamalarının politika süreçlerinde dikkate alınması, farklı bağlamlara uyarlanabilen çok düzeyli müdahalelerin geliştirilmesini destekleyebilir (Salume vd., 2026).

7. SONUÇ

Bu bölümde incelenen literatür, gıda kayıp ve atıklarının tedarik zincirinin farklı aşamalarında çeşitli nedenlerle ortaya çıktığını göstermektedir. Bu nedenle azaltma stratejilerinin, her aşamanın özellikleri ve uygulama koşulları dikkate alınarak geliştirilmesi önem taşımaktadır. Yapay zekâ ve dijital teknolojiler; talep tahmini, kalite ve bozulma risklerinin izlenmesi, stok yönetimi, fazla gıdanın yeniden dağıtılması ve atık oluşumunun takibi gibi alanlarda gıda kayıp ve atıklarının azaltılmasını destekleyebilmektedir. Ancak bu teknolojilerin etkin biçimde uygulanması; veri kalitesi, dijital altyapı, sistemler arası uyum, çalışan eğitimi ve paydaşlar arası iş birliği gibi faktörlere bağlıdır.

Teknolojik uygulamaların yanı sıra tüketici davranışları da gıda atıklarının azaltılmasında önemli bir rol oynamaktadır. Bilinçli satın alma, uygun depolama ve porsiyon planlaması gibi uygulamalar, dijital bilgilendirme ve izleme araçlarıyla desteklenebilir. Bu doğrultuda teknolojik çözümlerin, tüketici farkındalığını artırmaya ve hane düzeyinde atık oluşumunu azaltmaya yönelik davranış değişiklikleriyle birlikte ele alınması önemlidir.

Gıda kayıp ve atıklarının azaltılmasında hükümetlerin, gıda sektörü ve tüketici temsilcileriyle iş birliği yaparak yenilikçi teknolojileri teşvik etmesi ve bu alanda stratejiler geliştirmesi önemlidir.

Gelecekte yapılacak çalışmaların, yapay zekâ ve dijital teknolojilerin farklı ürün grupları, tedarik zinciri aşamaları ve tüketim ortamlarındaki uygulanabilirliğini, maliyetlerini ve sağladığı faydaları karşılaştırmalı olarak incelemesi, bu teknolojilerin gıda kayıp ve atıklarının azaltılmasına katkısının daha açık biçimde ortaya konulmasını sağlayabilir.

KAYNAKÇA

- Abdullah, L., Zulkifli, N., Liao, H., Herrera-Viedma, E., & Al-Barakati, A. (2019). An interval-valued intuitionistic fuzzy DEMATEL method combined with Choquet integral for sustainable solid waste management. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 82, 207–215.
- Ahmadzadeh, S., Ajmal, T., Ramanathan, R., & Duan, Y. (2023). A comprehensive review on food waste reduction based on IoT and big data technologies. *Sustainability*, 15(4), 3482. doi:10.3390/su15043482
- Alexander, C., Gregson, N., & Gille, Z. (2013). Food waste. In A. Murcott, W. Belasco, & P. Jackson (Eds.), *The handbook of food research* (pp. 471–484). London, England: Bloomsbury Academic. doi:10.5040/9781350042261-ch-0028
- Baig, M. B., Al-Zahrani, K. H., Schneider, F., Straquadine, G. S., & Mourad, M. (2019). Food waste posing a serious threat to sustainability in the Kingdom of Saudi Arabia—A systematic review. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 26(7), 1743–1752.
- Beretta, C., Stoessel, F., Baier, U., & Hellweg, S. (2013). Quantifying food losses and the potential for reduction in Switzerland. *Waste Management*, 33(3), 764–773.
- Bhatia, L., Jha, H., Sarkar, T., & Sarangi, P. K. (2023). Food waste utilization for reducing carbon footprints towards sustainable and cleaner environment: A review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(3), 2318.

- Bilska, B., Wrzosek, M., Kołożyn-Krajewska, D., & Krajewski, K. (2015). Food losses and food waste in the context of sustainable development of the food sector. *Chinese Business Review*, 14(9), 452–462. doi:10.17265/1537-1506/2015.09.005
- Bogusz, M., Matysik-Pejas, R., Krasnodębski, A., & Dziekański, P. (2021). The concept of zero waste in the context of supporting environmental protection by consumers. *Energies*, 14(18), 5964.
- Chalak, A., Abou-Daher, C., Chaaban, J., & Abiad, M. G. (2016). The global economic and regulatory determinants of household food waste generation: A cross-country analysis. *Waste Management*, 48, 418–422.
- Ciccullo, F., Cagliano, R., Bartezzaghi, G., & Perego, A. (2021). Implementing the circular economy paradigm in the agri-food supply chain: The role of food waste prevention technologies. *Resources, Conservation and Recycling*, 164, 105114.
- Ciccullo, F., Fabbri, M., Abdelkafi, N., & Pero, M. (2022). Exploring the potential of business models for sustainability and big data for food waste reduction. *Journal of Cleaner Production*, 340, 130673.
- Coşkun, A., & Özbük, R. M. Y. (2020). What influences consumer food waste behavior in restaurants? An application of the extended theory of planned behavior. *Waste Management*, 117, 170–178.
- De Sousa, W. G., de Melo, E. R. P., Bermejo, P. H. D. S., Farias, R. A. S., & Gomes, A. O. (2019). How and where is artificial intelligence in the public sector going? A literature review and research agenda. *Government Information Quarterly*, 36(4), 101392.

- De Steur, H., Wesana, J., Dora, M. K., Pearce, D., & Gellynck, X. (2016). Applying Value Stream Mapping to reduce food losses and wastes in supply chains: A systematic review. *Waste Management*, 58, 359–368.
- Di Talia, E., Simeone, M., & Scarpato, D. (2019). Consumer behaviour types in household food waste. *Journal of Cleaner Production*, 214, 166–172.
- Duan, K., Onyeaka, H., Pang, G., & Meng, Z. (2024). Pioneering food safety: Blockchain's integration in supply chain surveillance. *Journal of Agriculture and Food Research*, 18, 101281.
- Dudzik, W., Nalepa, J., & Kawulok, M. (2021). Evolving data-adaptive support vector machines for binary classification. *Knowledge-Based Systems*, 227, 107221.
- Elimelech, E., Ayalon, O., & Ert, E. (2018). What gets measured gets managed: A new method of measuring household food waste. *Waste Management*, 76, 68–81. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.03.031>
- Eriksson, M., Osowski, C. P., Malefors, C., Björkman, J., & Eriksson, E. (2017). Quantification of food waste in public catering services—A case study from a Swedish municipality. *Waste Management*, 61, 415–422. doi:10.1016/j.wasman.2017.01.035
- Faezirad, M., Pooya, A., Naji-Azimi, Z., & Haeri, M. A. (2021). Preventing food waste in subsidy-based university dining systems: An artificial neural network-aided model under uncertainty. *Waste Management & Research*, 39(8), 1027–1038. doi:10.1177/0734242X211017974

- Filimonau, V., & Delysia, A. (2019). Food waste management in hospitality operations: A critical review. *Tourism Management*, 71, 234–245.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2014). *Food wastage footprint: Full-cost accounting*. Rome, Italy: Author.
- Gajić, T., Vukolić, D., & Penić, M. (2024). Revival of the hotel industry: The impact of food waste reduction on Serbia's economic prospects. *Economics of Agriculture*, 71(1), 75–98.
- Gao, S., Bao, J., Li, R., Liu, X., & Wu, C. (2021). Drivers and reduction solutions of food waste in the Chinese food service business. *Sustainable Production and Consumption*, 26, 78–88.
- Garrone, P., Melacini, M., & Perego, A. (2014). Opening the black box of food waste reduction. *Food Policy*, 46, 129–139.
- Giroto, F., & Beggio, G. (2025). From burden to backbone: The regenerative potential of food waste through digital, biological, and technological innovation. *Frontiers in Nutrition*, 12, 1675732. doi:10.3389/fnut.2025.1675732
- Giroto, F., Galeazzi, A., Manenti, F., Gueguen, S., & Piazza, L. (2022). Water–food–energy nexus: Assessing challenges in the trend toward digitalization: The case study of an Italian winemaking industry. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 41(6), e13893. doi:10.1002/ep.13893
- González-Santana, R. A., Blesa, J., Frígola, A., & Esteve, M. J. (2022). Dimensions of household food waste focused on family and consumers. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 62(9), 2342–2354.

- Grover, D. K., & Singh, J. M. (2013). Post-harvest losses in wheat crop in Punjab: Past and present. *Agricultural Economics Research Review*, 26(2), 293–297.
- Gružauskas, V., Gimžauskienė, E., & Navickas, V. (2019). Forecasting accuracy influence on logistics clusters activities: The case of the food industry. *Journal of Cleaner Production*, 240, 118225.
- Gul, N., Muzaffar, K., Shah, S. Z. A., Assad, A., Makroo, H. A., & Dar, B. N. (2024). Deep learning hyperspectral imaging: a rapid and reliable alternative to conventional techniques in the testing of food quality and safety. *Quality Assurance and Safety of Crops & Foods*, 16(1), 78–97.
- Guo, H. N., Wu, S. B., Tian, Y. J., Zhang, J., & Liu, H. T. (2021). Application of machine learning methods for the prediction of organic solid waste treatment and recycling processes: A review. *Bioresource Technology*, 319, 124114
- Gustavsson, J., Cederberg, C., Sonesson, U., & Emanuelsson, A. (2013). *The methodology of the FAO study: “Global food losses and food waste—Extent, causes and prevention”*—FAO, 2011 (SIK Report No. 857). Swedish Institute for Food and Biotechnology (SIK).
- Gustavsson, J., Cederberg, C., Sonesson, U., van Otterdijk, R., & Meybeck, A. (2011). *Global food losses and food waste: Extent, causes and prevention*. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Han, Y., Zhang, S., & Zhu, D. (2025). Design for sustainable consumer behavior in food industry: A 10-year systematic literature review. *British Food Journal*, 127(12), 4368–4392.

- Handayanto, E., Irfani, A. D., & Masudin, I. (2025). A systematic literature review and future research agenda on the dynamics of food waste in the context of consumer behavior. *Sustainable Futures*, 9, 100491.
- Hasegawa, T., Havlík, P., Frank, S., Palazzo, A., & Valin, H. (2019). Tackling food consumption inequality to fight hunger without pressuring the environment. *Nature Sustainability*, 2(9), 826–833.
- Heikkilä, L., Reinikainen, A., Katajajuuri, J. M., Silvennoinen, K., & Hartikainen, H. (2016). Elements affecting food waste in the food service sector. *Waste Management*, 56, 446–453.
- Ikram, B. A. O., Abdelhakim, B. A., Abdelali, A., Zafar, B., & Mohammed, B. (2019, March). Deep learning architecture for temperature forecasting in an IoT LoRa based system. In *Proceedings of the 2nd International Conference on Networking, Information Systems & Security* (pp. 1–6).
- Jain, S., Newman, D., Cepeda-Márquez, R., & Zeller, K. (2018). *Global food waste management: An implementation guide for cities*. World Biogas Association. Retrieved from <https://www.worldbiogasassociation.org/wp-content/uploads/2018/05/Global-Food-Waste-Management-Full-report-pdf.pdf>
- Jamali, A., & Misman, Z. F. A. (2021). Food waste management: A case study of the employment of artificial intelligence for sorting technique. In E. Carvajal-Millan, A. K. Haghi, & A. Z. Yaser (Eds.), *Natural food products and waste recovery: Healthy foods, nutrition design, and extraction of valuable compounds* (pp. 185–205). Apple Academic Press.

- Jullien, S., Ariannezhad, M., Groth, P., & de Rijke, M. (2022). *A simulation environment and reinforcement learning method for waste reduction*. arXiv preprint arXiv:2205.15455.
- Kaipia, R., Dukovska-Popovska, I., & Loikkanen, L. (2013). Creating sustainable fresh food supply chains through waste reduction. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 43(3), 262–276.
- Kang, Z., Zhao, Y., Chen, L., Guo, Y., Mu, Q., & Wang, S. (2022). Advances in machine learning and hyperspectral imaging in the food supply chain. *Food Engineering Reviews*, 14(4), 596–616.
- Karunasena, G. G., Ananda, J., & Pearson, D. (2021). Generational differences in food management skills and their impact on food waste in households. *Resources, Conservation and Recycling*, 175, 105890.
- Kibler, K. M., Reinhart, D., Hawkins, C., Motlagh, A. M., & Wright, J. (2018). Food waste and the food-energy-water nexus: A review of food waste management alternatives. *Waste Management*, 74, 52–62.
- Kujala, S., & Koppelmäki, K. (2024). Regional economic assessment of a novel place-based model for sustainable food systems. *Geography and Sustainability*, 5(2), 220–229.
- Kumar, D., & Kalita, P. (2017). Reducing postharvest losses during storage of grain crops to strengthen food security in developing countries. *Foods*, 6(1), 8.
- Leal Filho, W., Ribeiro, P. C. C., Setti, A. F. F., Azam, F. M. S., Abubakar, I. R., Castillo-Apráiz, J., ... Borsari, B. (2024). Toward food waste reduction at universities.

- Environment, Development and Sustainability*, 26(7), 16585–16606. doi:10.1007/s10668-023-03300-2
- Li, X., Hu, W., Li, J., & Qing, P. (2024). The actionability of household food waste reduction. *Sustainable Production and Consumption*, 51, 55–66.
- Liu, Z., Wang, S., Zhang, Y., Feng, Y., Liu, J., & Zhu, H. (2023). Artificial intelligence in food safety: A decade review and bibliometric analysis. *Foods*, 12(6), 1242.
- Maiyar, L. M., Ramanathan, R., Swamy, S. L. B. N., & Ramanathan, U. (2023). Fighting food waste: How can artificial intelligence and analytics help? In N. Subramanian, S. G. Ponnambalam, & M. Janardhanan (Eds.), *Innovation analytics: Tools for competitive advantage* (pp. 171–189). Singapore: World Scientific. https://doi.org/10.1142/9781786349989_0008
- Mayanti, B. (2024). Life cycle assessment and waste reduction optimisation of household food waste in Finland. *Science of the Total Environment*, 957, 177438.
- Murthy, D. S., Gajanana, T. M., Sudha, M., & Dakshinamoorthy, V. (2009). Marketing and post-harvest losses in fruits: Its implications on availability and economy. *Indian Journal of Agricultural Economics*, 64(2), 259–275.
- Ng, P. Y., & Sia, J. K. M. (2023). Managers’ perspectives on restaurant food waste separation intention: The roles of institutional pressures and internal forces. *International Journal of Hospitality Management*, 108, 103362.
- Okumus, B., Taheri, B., Giritlioglu, I., & Gannon, M. J. (2020). Tackling food waste in all-inclusive resort hotels. *International Journal of Hospitality Management*, 88, 102543.

- Olawade, D. B., Fapohunda, O., Wada, O. Z., Usman, S. O., Ige, A. O., Ajisafe, O., & Oladapo, B. I. (2024). Smart waste management: A paradigm shift enabled by artificial intelligence. *Waste Management Bulletin*, 2(2), 244–263. <https://doi.org/10.1016/j.wmb.2024.05.001>
- Onyeaka, H., Akinsemolu, A., Miri, T., Nnaji, N. D., Duan, K., Pang, G., ... Ugwa, C. (2025). Artificial intelligence in food system: Innovative approach to minimizing food spoilage and food waste. *Journal of Agriculture and Food Research*, 21, 101895. doi:10.1016/j.jafr.2025.101895
- Onyeaka, H., Tamasiga, P., Nwauzoma, U. M., Miri, T., Juliet, U. C., Nwaiwu, O., & Akinsemolu, A. A. (2023). Using artificial intelligence to tackle food waste and enhance the circular economy: Maximising resource efficiency and minimising environmental impact: A review. *Sustainability*, 15(13), 10482.
- Oyedotun, T. D. T., & Moonsammy, S. (2021). Linking national policies to beneficiaries: Geospatial and statistical focus to waste and sanitation planning. *Environmental Challenges*, 4, 100142.
- Pachiappan, K., Anitha, K., Pitchai, R., Sangeetha, S., Satyanarayana, T. V. V., & Boopathi, S. (2024). Intelligent machines, IoT, and AI in revolutionizing agriculture for water processing. In B. B. Gupta & F. Colace (Eds.), *Handbook of research on AI and ML for intelligent machines and systems* (pp. 374–399). Hershey, PA: IGI Global Scientific Publishing. doi:10.4018/978-1-6684-9999-3.ch015
- Papargyropoulou, E., Lozano, R., Steinberger, J. K., Wright, N., & Bin Ujang, Z. (2014). The food waste hierarchy as a

- framework for the management of food surplus and food waste. *Journal of Cleaner Production*, 76, 106–115.
- Parfitt, J., Barthel, M., & Macnaughton, S. (2010). Food waste within food supply chains: Quantification and potential for change to 2050. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 365(1554), 3065–3081. doi:10.1098/rstb.2010.0126
- Pawar, D., Presti, D. L., Silvestri, S., Schena, E., & Massaroni, C. (2023). Current and future technologies for monitoring cultured meat: A review. *Food Research International*, 173, 113464.
- Pawlak, K., & Kołodziejczak, M. (2020). The role of agriculture in ensuring food security in developing countries: Considerations in the context of the problem of sustainable food production. *Sustainability*, 12(13), 5488. doi:10.3390/su12135488
- Pouladzadeh, P., Shirmohammadi, S., Bakirov, A., Bulut, A., & Yassine, A. (2015). Cloud-based SVM for food categorization. *Multimedia Tools and Applications*, 74(14), 5243–5260.
- Prasad, A., Mann, H., Najm, L., Khan, S., Filipe, C. D. M., & Didar, T. F. (2026). Cross-sectoral AI integration is essential to tackling food waste and food insecurity: A roadmap for developing resilient food systems. *Advanced Intelligent Systems*, e70528. doi:10.1002/aisy.70528
- Quintero-Angel, M., Mendoza-Salazar, D. M., & Martínez-Girón, J. (2022). Food fears and risk of loss of food heritage: A little-explored effect of food modernity and times of pandemic. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 28, 100499.

- Roodhuyzen, D. M., Luning, P. A., Fogliano, V., & Steenbekkers, L. P. A. (2017). Putting together the puzzle of consumer food waste: Towards an integral perspective. *Trends in Food Science & Technology*, 68, 37–50.
- Sagar, N. A., Pareek, S., Sharma, S., Yahia, E. M., & Lobo, M. G. (2018). Fruit and vegetable waste: Bioactive compounds, their extraction, and possible utilization. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 17(3), 512–531.
- Sakaguchi, L., Pak, N., & Potts, M. D. (2018). Tackling the issue of food waste in restaurants: Options for measurement method, reduction and behavioral change. *Journal of Cleaner Production*, 180, 430–436.
- Salume, P. K., Barbosa, M. W., & Pinto, M. de R. (2026). Food waste and consumer behavior: A bibliometric and review study and future research directions. *Foods*, 15(2), 380. <https://doi.org/10.3390/foods15020380>
- Samuel, A. U., Oyawale, F., & Fayomi, O. S. I. (2019). Effects of waste management in beverage industries: A perspective. *Journal of Physics: Conference Series*, 1378(2), 022048.
- Schmidt, R., Chen, Z., & Soldan, V. P. (2022). Choice posture, architecture, and infrastructure: Systemic behavioral design for public health policy. *She Ji: The Journal of Design, Economics, and Innovation*, 8(4), 504–525.
- Selukar, M., Jain, P., & Kumar, T. (2022). Inventory control of multiple perishable goods using deep reinforcement learning for sustainable environment. *Sustainable energy technologies and assessments*, 52, 102038.
- Sharma, P., Gaur, V. K., Gupta, S., Varjani, S., Pandey, A., Gnansounou, E., ... Wong, J. W. C. (2022). Trends in

mitigation of industrial waste: Global health hazards, environmental implications and waste derived economy for environmental sustainability. *Science of the Total Environment*, 811, 152357.

Sharma, P., Vimal, A., Vishvakarma, R., Kumar, P., Porto de Souza Vandenberghe, L., Gaur, V. K., & Varjani, S. (2022). Deciphering the blackbox of omics approaches and artificial intelligence in food waste transformation and mitigation. *International Journal of Food Microbiology*, 372, 109691.

Shiraishi, C. S. H., Roriz, C. L., Carocho, M., Prieto, M. A., Abreu, R. M. V., Barros, L., & Heleno, S. A. (2025). Blockchain revolution in food supply chains: A positive impact on global food loss and waste. *Food Chemistry*, 467, 142331. doi:10.1016/j.foodchem.2024.142331

Silva, A., Junqueira, L., Truninger, M., Delicado, A., Csenki, E., Fehér, Á., ... Szakos, D. (2023). Assessing learning about food safety using personal meaning maps. *Health Education Journal*, 82(6), 664–679.

Soni, A., Dixit, Y., Reis, M. M., & Brightwell, G. (2022). Hyperspectral imaging and machine learning in food microbiology: Developments and challenges in detection of bacterial, fungal, and viral contaminants. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 21(4), 3717–3745.

Sonwani, E., Bansal, U., Alroobaea, R., Baqasah, A. M., & Hedabou, M. (2022). An artificial intelligence approach toward food spoilage detection and analysis. *Frontiers in Public Health*, 9, 816226.

Spang, E. S., Moreno, L. C., Pace, S. A., Achmon, Y., Donis-Gonzalez, I., Gosliner, W. A., ... Tomich, T. P. (2019).

- Food loss and waste: Measurement, drivers, and solutions. *Annual Review of Environment and Resources*, 44, 117–156. doi:10.1146/annurev-environ-101718-033228
- Stancu, V., Haugaard, P., & Lähteenmäki, L. (2016). Determinants of consumer food waste behaviour: Two routes to food waste. *Appetite*, 96, 7–17.
- Stangherlin, I. D. C., & De Barcellos, M. D. (2018). Drivers and barriers to food waste reduction. *British Food Journal*, 120(10), 2364–2387.
- Stuart, T. (2009). *Waste: Uncovering the global food scandal*. WW Norton & Company.
- Sustainable Restaurant Association. (2010). *Too good to waste: Restaurant food waste survey report*. London, England: Author.
- Tang, J., Tang, Y., Liu, Y., Su, H., Zhang, Y., Sun, Z., & Ma, X. (2023). Using machine learning method to predict food waste in catering industry under high resolution: A case in Dongguan. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 25(4), 2442–2456. doi:10.1007/s10163-023-01706-8
- Thyberg, K. L., Tonjes, D. J., & Gurevitch, J. (2015). Quantification of food waste disposal in the United States: a meta-analysis. *Environmental science & technology*, 49(24), 13946–13953.
- Tomaszewska, M., Bilska, B., & Kołożyn-Krajewska, D. (2021). Food waste in catering establishments—An analysis of causes and consequences. *European Journal of Sustainable Development*, 10(1), 365. doi:10.14207/ejsd.2021.v10n1p365

- United Nations Environment Programme. (2024). *Food waste index report 2024: Think eat save—Tracking progress to halve global food waste*. Nairobi, Kenya: Author. Retrieved from <https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/45230>
- Wager, S., & Athey, S. (2018). Estimation and inference of heterogeneous treatment effects using random forests. *Journal of the American Statistical Association*, 113(523), 1228–1242.
- Wu, Z., Mohammed, A., & Harris, I. (2021). Food waste management in the catering industry: Enablers and interrelationships. *Industrial Marketing Management*, 94, 1–18. doi:10.1016/j.indmarman.2021.01.019
- Wunderlich, S. M., & Martinez, N. M. (2018). Conserving natural resources through food loss reduction: Production and consumption stages of the food supply chain. *International Soil and Water Conservation Research*, 6(4), 331–339.
- Yusoff, N. I. B. M., Godsell, J., & Woolley, E. (2024). Towards zero waste: A comprehensive framework for categorizing household food waste. *Sustainable Production and Consumption*, 48, 1–13.
- Zrnić, M., Blagojević, O., & Čavić, S. (2023). The role and importance of gastronomic tourism in Serbia and Montenegro in the function of destination branding. *BizInfo Blace*, 14(1), 25–32.

AKILLI ZEYTİNYAĞI İŞLEME TEKNOLOJİLERİ (GIDA 4.0): KONTİNÜ MALAKSASYON DİNAMİKLERİNİN YAPAY SİNİR AĞLARI İLE MODELLENMESİ, KEMOMETRİK KALİTE İZLEME VE HIZLI SPEKTROSKOPİK TAĞŞIŞ TESPİTİ

Fulya HARP ÇELİK¹

1. GİRİŞ

Gıda endüstrisinde dördüncü sanayi devrimi ilke ve teknolojilerinin uygulanması, geleneksel gıda işleme tekniklerinin dijitalleşme, nesnelerin interneti ve veri odaklı otomasyon süreçleriyle yeniden şekillenmesini sağlamaktadır. Bu dönüşüm kapsamında zeytinyağı ekstraksiyon teknolojileri açısından Gıda 4.0 yaklaşımı, tekil şekilde "akıllı değirmen" teknolojisi olarak değerlendirilmek yerine, bütüncül bir kapalı döngü entegrasyonu biçiminde ele alındığında çok daha doğru ve kapsayıcı bir şekilde anlaşılabilir. Söz konusu sistem içerisinde ; proses sensörleri ile spektral ölçümlerden elde edilen anlık analitik veriler matematiksel tahmin modellerini beslemekte, bu modeller ekstraksiyon verimliliği ile nitel kalite parametrelerini öngörmekte, otomasyon denetim sistemleri elde edilen bu tahminleri işletme koşullarını anlık olarak optimize edip ayarlamak amacıyla kullanmakta ve son olarak hızlı doğrulama araçları vasıtasıyla tesise kabul edilen hammadde ile işlenmiş nihai ürünlerin nitelikleri sürekli izlenebilir kılınmaktadır. Literatürde yer alan; özellikle yakın kızılötesi spektroskopisi

¹ Dr. Öğretim Üyesi, Hasan Kalyoncu Üniversitesi, Turizm Fakültesi, Gastronomi ve Mutfak Sanatları, ORCID: 0000-0003-1217-5951.

(NIR) ve yapay sinir ağları (ANN) tabanlı proses tahmini, sensör donanımlı yoğurma (malaksasyon) makineleri ile spektroskopi ve kemometrik doğrulama teknikleri gibi bu bütüncül yaklaşımın kritik bileşenlerini destekleyen önemli sayıda araştırmanın olduğu görülmektedir (Vallone ve ark., 2022). Bununla beraber, tüm aşamalarıyla tamamen doğrulanmış, farklı üretim tesislerine ölçeklenebilir şekilde aktarılabilir ve uçtan uca otonom çalışma yetkinliğine sahip entegre bir endüstriyel sistemin varlığına ilişkin deneysel ve uygulamalı kanıtlar halen sınırlı düzeyde seyretmektedir (Funes ve ark., 2017).

Mevcut bilimsel veriler dikkate alındığında, sektör açısından kısa vadede uygulanabilirliği en yüksek fırsat, doğrudan bir otomasyon mekanizmasından ziyade, malaksasyon prosesine yönelik karar destek sistemlerinin geliştirilmesidir. Malaksasyon aşamasındaki işlem parametreleri ve çevre koşulları; toplam ekstraksiyon verimi, fenolik bileşik bileşimi, uçucu madde profili ve yağın oksidasyon seviyesi üzerinde birbiriyle doğrudan rekabet eden ve çelişen etkiler meydana getirmektedir. Yapay sinir ağları ile kinetik modelleme yaklaşımları bu karmaşık kalite ve verim sonuçlarını önceden tahmin edebilirken, sürece entegre edilen oksijen ve sıcaklık izleme sistemleri de çalışma koşullarını tam anlamıyla görünür ve gözlemlenebilir hale getirmektedir.

Diğer taraftan, spektroskopik taşıyıcı sınıflandırma modelleri özel olarak kontrol edilen ve hazırlanan deneysel örnek setlerinde yüksek ayırıştırma performansı bildirmektedir. Bununla birlikte, elde edilen bu metodolojik sonuçlar; kullanılan taşıyıcı maddeleri, ölçüm cihazları, örnek popülasyonları veya deneysel doğrulama tasarımları arasında doğrudan değiştirilebilir ve genel geçer nitelikte değildir. Bu doğrultuda, söz konusu ileri teknolojilerin laboratuvar ölçeğinden endüstriyel ölçekteki reel uygulamalara aktarılabilmesi; bağımsız harici doğrulamaların gerçekleştirilmesine, cihazlar arası kalibrasyon transferine, süreç

entegrasyonunun eksiksiz sağlanmasına ve geleneksel referans analiz yöntemlerine entegre net bir geçiş mekanizmasına bağlıdır.

2. TİTREŞİM SPEKTROSKOPİSİ TEKNİKLERİ VE SPEKTRAL BÖLGELERİN SINIFLANDIRILMASI

Moleküler düzeydeki analitik analizlerde kullanılan en temel üç titreşim spektroskopisi tekniği; Orta Kızılötesi (MIR), Yakın Kızılötesi (NIR) ve Raman spektroskopisidir. Titreşim spektroskopisi, molekülleri oluşturan kimyasal bağlara ait titreşim hareketlerinin elektromanyetik spektrum üzerindeki karşılıklarına dayanmakta ve genel olarak 0,76 ila 1000 μm dalga boyu veya 13.000 ila 10 cm^{-1} dalga sayısı aralığındaki spektral bölgenin kullanımını içermektedir. Bu sebeple, Kızılötesi (IR) spektral bölge, analitik uygulamalar açısından üç ana alt alana ayrılmaktadır:

Uzak Kızılötesi (FIR): 26 ila 1000 μm (400 ila 10 cm^{-1})

Orta Kızılötesi (MIR): 2,6 ila 26 μm (4.000 ila 400 cm^{-1})

Yakın Kızılötesi (NIR): 0,76 ila 2,6 μm (13.000 ila 4.000 cm^{-1})

2.1. Orta Kızılötesi (MIR) Spektroskopisinin Teorik Esasları ve Numune Alma Teknikleri

Orta Kızılötesi (MIR) spektrumu, molekülü oluşturan atomların titreşimsel ve dönme frekanslarında gerçekleşen enerji emilimini kaydetmektedir. Örneğin, yalnızca tek bir emilim bandına sahip olan iki atomlu moleküllerde bu emilim frekansları, atomların denge konumu etrafında gerildiği bir yay modeli çerçevesinde açıklanabilmektedir (Gendrin ve ark.,2008). Daha karmaşık moleküler yapılarda ise titreşimler birbiriyle eşleşebilmekte; bu durum gerilme ve bükülme hareketlerinin yanı

sıra üst ton, kombinasyon bantları ve Fermi rezonanslarının ortaya çıkmasına yol açarak MIR spektrumlarının yorumlanmasını karmaşıklştırmaktadır (Zeytinyağına ait tipik MIR spektrumları Şekil 2a'da sunulmuştur). Bu karmaşıklığa rağmen, belirli kimyasal grupların teşhisinde karakteristik absorpsiyon frekanslarından yararlanılmakta olup MIR spektroskopisi geleneksel olarak bu amaç doğrultusunda kullanılmaktadır (Karoui ve ark., 2010).

Analiz süreçlerinde nitelikli bir MIR geçirgenlik spektrumu elde edebilmek adına numunelerin emici olmayan bir matris ile seyreltilmesi gerekmektedir; aksi takdirde ışığın dedektöre iletimi sağlanamamaktadır. Geliştirilmiş numune alma teknikleri (örneğin Zayıflatılmış Toplam Yansıma - ATR) ise MIR yansıma-emilim spektrumlarının elde edilmesine imkân tanımaktadır. ATR tekniği, saçılma etkilerini bertaraf ederek toz veya tablet formundaki katı numunelerin herhangi bir seyreltme işlemine ihtiyaç duyulmaksızın doğrudan analiz edilmesine olanak sağlamaktadır (Hannah 2002, Reich 2002). ATR-Fourier dönüşümü MIR (ATR-FT-MIR) tekniği, en önemli proses analitik teknolojisi (PAT) araçlarından biri olarak geliştirilmiştir.

2.2. Yakın Kızılötesi (NIR) Spektroskopisinin Temel Prensipleri, Tarihsel Gelişimi ve Spektral Özellikleri

Yakın Kızılötesi (NIR) spektrumları, moleküler kombinasyon ve üst ton titreşimlerinin kaydedilmesi prensibine dayanmaktadır (Rinnan ve ark.,2009). En belirgin NIR emilim bantları; -C-H, -S-H, -N-H ve -O-H gibi fonksiyonel gruplardaki hidrojen bağlarının moleküler titreşimlerine bağlı olarak gerçekleşen ışık emiliminden kaynaklanmaktadır.

NIR bölgesi, 200 yılı aşkın bir süre önce John F. W. Herschel tarafından keşfedilmiş olup 1960'lı yıllardan itibaren analitik alanda yaygın olarak kullanılan bir teknik niteliği

kazanmıştır. NIR spektroskopisinin günümüzdeki akademik ve endüstriyel başarısı, spesifik gıda ve tarım ürünlerinin analizi ile kalite kontrol süreçlerinde tekniğin Süreç Analitik Teknolojisi (PAT) aracı olarak sahip olduğu potansiyeli ortaya koyan Norris ve arkadaşlarına dayanmaktadır (Norris,1976).

NIR absorbands sinyali, üst ton ve kombinasyon titreşimlerinin meydana gelme olasılığının düşük olması sebebiyle zayıf bir karakter sergilemekte ve genellikle spesifik olmamaktadır. Bu durum, numunelerin NIR spektral aralığında herhangi bir seyreltme işlemine tabi tutulmadan analiz edilmesine olanak tanımaktadır. Organik fonksiyonel grupların spesifik absorpsiyon göstermesi sayesinde absorbands bantları doğrudan yorumlanabilen MIR spektrumları ile kıyaslandığında NIR spektrumları; hidrojen bağlarına ait üst üste binen üst tonlar ve kombinasyon bantlarının varlığından ötürü doğası gereği daha karmaşık bir yapıya sahiptir. İlaveten, analiz edilen numunenin fiziksel durumları ile ölçüm yapılan ortam koşulları da spektrumlar üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olmakta ve bu durum veri yorumlama süreçlerini derinleştirmektedir (Luypaert ve ark.,2007).

2.3. Raman Spektroskopisinin Çalışma Mekanizması, Spektral Özellikleri ve Hibrit Analitik Uygulamaları

Raman spektroskopisi, moleküler titreşimlere ilişkin analitik verilerin elde edilmesinde emilim (absorpsiyon) mekanizması yerine saçılan ışığın ölçülmesi prensibinden yararlanmaktadır (Raman ve ark.,1928). Analiz sürecinde numuneler, genellikle bir lazer kaynağından yayılan monokromatik (tek renkli) bir ışın demeti ile uyarılmaktadır. Işınım moleküler matrisle etkileşime girdiğinde, radyasyonun büyük bir bölümü gelen ışının frekansı ile aynı frekansta saçılıma uğramakta (elastik Rayleigh saçılması); son derece küçük bir

oranı ise (10^9 'da 1 ila 10^6 'da 1 mertebesinde) daha kısa (anti-Stokes Raman saçılması) veya daha uzun (Stokes Raman saçılması) dalga boylarında saçılmaktadır. Saçılan ışığın dalga boyunda meydana gelen bu kayma miktarı, saçılma olayından sorumlu kimyasal bağın türüne ve moleküler konfigürasyona bağlı olarak değişkenlik göstermektedir.

Genel bir kural olarak bir molekül, gerçekleşen titreşim hareketi esnasında kutuplanabilirliğinde (polarizabilite) bir değişim meydana geldiğinde Raman-aktif nitelik kazanmaktadır.

MIR spektroskopisi ile kıyaslandığında Raman analizi oldukça yalın bir yöntemsel akış sunmakta ve yalnızca temel düzeyde bir numune hazırlık süreci gerektirmektedir. Buna ek olarak, görünür bölge ve NIR lazer kaynakları gibi farklı optik kaynakların kullanımı, analizin cam veya özel hücreler içerisinden doğrudan gerçekleştirilmesine imkân tanımaktadır. Konfokal teknolojilerin gelişimiyle birlikte Raman spektroskopisi, şeffaf sistemlerin tahribatsız (non-destructive) derinlik profillemesi çalışmalarında efektif bir yöntem haline gelmiştir. Ayrıca, elde edilen bant morfolojileri ve bağlı sinyal yoğunlukları, analiz edilen maddelerin fiziki morfolojisinden etkilenmemektedir (Chalmers ve ark., 2007).

Raman spektroskopisi; Yüksek Performanslı Sıvı Kromatografisi (HPLC), Taramalı Tünelleme Mikroskobu (STM), Mikrokromatografi ve Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) gibi ileri analitik sistemlerle entegre edilebilmektedir. Söz konusu hibrit analitik konfigürasyonlar, Raman spektroskopisini eser miktardaki (trace-level) bileşenlerin tayininde rutin bir analitik araca dönüştürmektedir.

Bununla birlikte, sunulan tüm spektroskopik tekniklerde (MIR, NIR ve Raman spektroskopisi) olduğu gibi, bu yöntemlerin de kendilerine özgü analitik kısıtlamaları bulunmaktadır.

2.4. Kemometri ve Spektroskopik Verilerin Değerlendirilmesindeki Rolü

Zeytinyağının kalite değerlendirmesi ile coğrafi ve botanik orijin doğrulama çalışmalarında titreşimsel spektroskopi tekniklerinin elde ettiği başarıdaki en kritik faktörlerden biri, kemometrik yöntemlerin gelişmesidir. Zeytinyağı matrisinin içerdiği bileşenlerin karmaşık yapısı sebebiyle, özellikle güçlü istatistiksel yazılımlar kullanılmaksızın zeytinyağının diğer yemeklik yağlardan ayrılması veya farklı bitkisel yağlarla karıştırılmış ürünlerin orijinlerinin doğrulanması oldukça güçtür. Kemometri; istatistiksel ve matematiksel veri odaklı yaklaşımlarla kimyasal matrislerden analitik bilgi elde etme bilimi olarak tanımlanmaktadır (Miller ve ark., 2005).

İncelenecek bilgi türlerine bağlı olarak kemometrik analizler iki ana grupta ele alınmaktadır: Keşifsel Veri Analizi (EDA) ve Örüntü Tanıma Yöntemleridir.

2.4.1. Keşifsel Veri Analizi (EDA)

Keşifsel Veri Analizi, genellikle verilerin genel özelliklerini, örnekler ile değişkenler arasındaki olası ilişkileri değerlendirmek ve veri matrisindeki örüntüleri özetlemek amacıyla kullanılmaktadır. Temel Bileşen Analizi (PCA), Faktör Analizi (FA) ve Projeksiyon Arayışı (PP), EDA kapsamında yaygın olarak başvuru alan üç temel yöntemdir. Keşifsel veri analizinin temel amaçları şu şekilde sıralanmaktadır:

- Orijinal değişkenlerin doğrusal kombinasyonları yoluyla gizil (latent) değişken sayısını azaltarak önemli ve ilgili bilginin çıkarılması,
- Nesneler arasındaki benzerlik ve farklılıkların incelenmesi yoluyla olası gruplanma ve kümelerin belirlenmesi,
- Veri setindeki aykırı değerlerin (outliers) tespiti,

- Örnekler ve/veya değişkenler arasındaki eğilimlerin belirlenmesi (Bosque-Sendra ve ark., 2012).

EDA yöntemleri, genel olarak örüntü tanıma teknikleriyle gerçekleştirilen sınıflandırma süreçlerinin ilk adımını oluşturmaktadır.

2.4.2. Örüntü Tanıma ve Sınıflandırma Yöntemleri

Örneklerin ait olduğu sınıf bilgisinin önceden bilinip bilinmemesine bağlı olarak iki farklı sınıflandırma yaklaşımı uygulanmaktadır: Denetimsiz Örüntü Tanıma ve Denetimli Örüntü Tanıma Yöntemleri (Berrueta ve ark., 2007).

A. Denetimsiz Örüntü Tanıma Yöntemleri**

Denetimsiz örüntü tanıma yöntemleri, veriler hakkında herhangi bir ön bilgi varsayımında bulunmaksızın veri matrisine tarafsız bir yaklaşım sunar ve veri kümesindeki potansiyel örüntülerin keşfedilmesinde kullanılır. En yaygın denetimsiz yöntemler Temel Bileşen Analizi (PCA), Sağlam PCA (Robust PCA), Hiyerarşik Küme Analizi (HCA) ve K-Ortalamalar (K-means) algoritmasıdır. Bunlar arasında PCA ve HCA en sık tercih edilen yaklaşımlardır.

Temel Bileşen Analizi (PCA): İlk olarak 1901 yılında Pearson tarafından geliştirilen PCA, çok boyutlu veri uzayını daha düşük boyutlu bir alt uzaya dönüştürmek amacıyla kullanılır. Bu teknik, veri kümesindeki toplam varyansın büyük kısmını, "Ana Bileşenler" (PC'ler) olarak adlandırılan daha az sayıdaki bağımsız değişken üzerinden ifade eder. Her bir ana bileşen orijinal değişkenlerin doğrusal bir kombinasyonudur ve birbirini takip eden her PC, bir önceki bileşen tarafından açıklanamayan maksimum varyans miktarını temsil eder (Smolinska ve ark., 2012). PCA, orijinal veri matrisini "skorlar" (scores) ve "yüklemeler" (loadings) olmak üzere iki ana matrise dönüştürür. Skorlar, örneklerin yeni koordinat sistemindeki

konumlarını göstererek nesneler arasındaki benzerlik veya farklılık derecelerini ortaya koyar (yakın noktalar benzer analitik profilleri temsil eder). PC yüklemeleri ise orijinal değişkenlerin yeni bileşenlere doğrusal katkısını ve değişkenlerin dönüşüm sürecindeki ağırlıklarını açıklar.

Hiyerarşik Küme Analizi (HCA): Örnekleri benzerlik derecelerine göre gruplandıran bir diğer denetimsiz yöntemdir. HCA uygulaması iki temel fonksiyonun belirlenmesini gerektirir: Örnekler arası benzerlik metriği (ör. Öklid, Mahalanobis veya Minkowski mesafeleri) ve bağlantı kriteri (ör. tekli, ortalama, tam veya Ward bağlantı yöntemi). HCA, verileri kümeleyerek "dendrogram" adı verilen hiyerarşik ağaç grafikleri oluşturur. Her türlü geçerli mesafe ölçüsünün kullanılabilmesi HCA'nın belirgin bir avantajı olmakla birlikte, yöntem yalnızca mesafe matrisine dayandığı için kümelemenin içsel mekanizması hakkında derinlemesine detay sunmamaktadır.

B. Denetimli Örüntü Tanıma Yöntemleri

Denetimsiz tekniklerle kıyaslandığında denetimli örüntü tanıma yöntemleri sınıflandırma süreçlerinde daha yüksek bir etkinlik sergilemektedir. Bu yöntemler, ölçülen analitik özelliklerin örüntüsüne dayanarak bilinmeyen örnekleri önceden tanımlanmış kategorilere atamak amacıyla, önsel bilgilere dayalı matematiksel sınıflandırma modelleri oluşturur. Denetimli bir yaklaşımda, ön bilgi içeren bir "eğitim seti" (training set) kullanılarak model inşa edilir; ardından oluşturulan model, eğitim seti dışında kalan bilinmeyen örneklerin kategorik tahmininde kullanılır.

Denetimli yöntemlerin yüksek modelleme kapasitesi, veriler arasında gerçekte anlamlı bir ilişki bulunmadığı durumlarda dahi veriye mükemmel uyum sağlayan hatalı modellerin oluşma riskini (aşırı uyum / over-fitting) beraberinde getirmektedir (Gonzalez, 2007). Bu nedenle model doğrulama

aşaması, sınıflandırma uygulamalarının kritik bir adımını oluşturur. Sınıflandırma modelinin tahmin kabiliyetini test etmek amacıyla genellikle eğitim setinden bağımsız bir "doğrulama seti" (validation set) kullanılır. Model doğrulamada en sık başvurulan teknikler Çapraz Doğrulama (Cross-Validation) ve Çift Çapraz Doğrulama (Double Cross-Validation) yöntemleridir.

Literatürde en sık kullanılan denetimli örüntü tanıma teknikleri şunlardır:

- Doğrusal Ayırt Edici Analiz (LDA)
- k-En Yakın Komşu (k-NN)
- Kısmi En Küçük Kareler Ayırt Edici Analizi (PLS-DA)
- Yumuşak Bağımsız Modelleme Sınıf Benzetimi (SIMCA)
- Yapay Sinir Ağları (ANN)

2.5. Zeytinyağında Yapılan Analizler

NIR, zeytin, salça ve zeytinyağına üretim hattı üzerinde, hat içinde veya hat üzerinde uygulanabildiği için caziptir. İncelemeler, çevrimiçi meyve analizi ve salça ve zeytinyağındaki kalite parametrelerinin değerlendirilmesi için kemometrik işlemlerle birlikte kullanımının yanı sıra başarılı değirmen uygulamalarını da açıklamaktadır (Armenta ve ark.,2010).

Daha kapsamlı izleme incelemeleri, asitlik, peroksit indeksleri, olgunluk, duysal özellikler ve ikincil bileşenleri değerlendirmek için kızılötesi spektroskopisi, bilgisayarlı görüntüleme, elektronik burunlar, elektronik diller ve dielektrik spektroskopisini de kapsamaktadır.

Yapay sinir ağları, dolaylı ölçümleri kalite kategorilerine veya laboratuvar sonuçlarına eşleştirebilir. Bir çalışmada, serbest yağ asitleri, peroksit değeri, UV absorbansı, diasilgliseroller ve pirofeofitinler de dahil olmak üzere altı kimyasal parametre,

eğitilmiş panel kalite etiketleriyle ilişkilendirilmiş ve altı katlı çapraz doğrulama ve üç kör testte yaklaşık %95-96 oranında doğru sınıflandırma rapor edilmiştir.

Bu durum, sensörle erişilebilir kimyayı duyuşal bir referansla birleştirmenin değeriini göstermektedir, ancak bağımsız doğrulama yapılmadan eğitilmiş panellerin veya resmi sınıflandırma prosedürlerinin yerini alacak şekilde yorumlanmamalıdır.

Faydalı bir izleme mimarisi üç görevi birbirinden ayırır: işlem durumu tahmini (örneğin, hamur sıcaklığı, oksijen, nem, akış); kaliteyle ilgili sonuçların hızlı tahmini (örneğin, fenolikler, asitlik, oksidasyon indeksleri, uçucu maddeler); ve tahmini eyleme geçirilebilir hale getiren alarmlar veya öneriler. Literatürde sensörlü yoğurma, NIR/ANN tahmini ve kalite sınıflandırması gibi bileşen örnekleri verilmektedir, ancak incelenen kaynaklar, yeniden kalibrasyona gerek kalmadan değirmenler ve çeşitler arasında aktarılabilecek genel olarak doğrulanmış bir model göstermemektedir (John ve ark.,2014).

Bu nedenle, model belirsizliği, sapma, örnekleme temsil edilebilirliği ve referans yöntem uyumu, tek bir tahmini kalite puanının arkasına gizlenmek yerine operatörlere gösterilmelidir.

Kemometrik yöntemlerle birleştirilmiş spektroskopi, farklı yöntemlerin farklı avantaj ve dezavantajlarıyla birlikte, hızlı ve düşük numune hazırlama gerektiren tarama imkanı sunar. Karşılaştırmalı bir soya yağı tağıışı çalışmasında, PLS-DA ile FTIR ve Vis-NIR için %100 sınıflandırma doğruluğı bulunmuştur; açılımlı PLS-DA ile EEM floresansı %73'e ulaşırken, geri yayımlı ANN ve tensör ayrıştırma ön işlemeli EEM %100'e ulaşmıştır. Bu sonuçlar veri setine özgüdür; aynı makale, FTIR ve Vis-NIR'ın kullanımının ve modellenmesinin daha kolay olduğunu belirtmiştir.

NIR hiperspektral görüntüleme, kütlece %1 ila %100 arasında değişen karışımlarda fındık, rafine zeytin ve posa yağları da dahil olmak üzere kimyasal olarak daha benzer katkı maddelerine karşı test edilmiştir. Çoklu sınıflandırıcılar yüksek doğruluk oranları göstermiş ve incelenen sınıflandırma görevlerinde yapay sinir ağı (YSA) doğruluğu %99,2 ila %100 arasında rapor edilmiştir. Hazırlanan karışımlarda elde edilen neredeyse mükemmel sonuçlar, uygulanabilirliği göstermekte, ancak çeşitli ticari örneklerde düşük katkı maddesi seviyelerinde gerçek dünya hassasiyetini mutlaka göstermemektedir.

Beş farklı tohum yağı üzerinde yapılan, düşük çözünürlüklü kompakt bir NIR cihazı çalışması, %96'ya varan tanımlama oranları ve %1,2'lik ortalama katkı maddesi miktar tahmin hatası bildirirken, standartlaştırılmış kalibrasyon modellerinin gelecekteki çalışmalar için önemli olduğunu açıkça belirtmiştir.

Floresans, bir diğer hızlı yöntem sunmaktadır. 2024 yılında yapılan bir çalışmada, PCA ve PLS regresyonu ile 3 boyutlu floresans kullanılmıştır; katkı maddesi yüzdesini tahmin etmede bildirilen korelasyon katsayısı 0,999'dur ve modeller ayrıca seçilen kalite indekslerini de tahmin etmiştir.

Bu kadar yüksek korelasyonlar, örnek tasarımı ve doğrulama protokolüyle birlikte yorumlanmalıdır; korelasyon tek başına, düzenleyici karar eşiklerinde güvenilir tespit sağlamaz veya görünmeyen kaynaklara, hasatlara ve araçlara aktarımı garanti etmez.

Pratik uygulamada, spektral modeli kesin bir yasal test olarak ele almaktansa iki aşamalı bir iş akışı daha savunulabilir bir yaklaşımdır: tarama ve önceliklendirme için hızlı bir spektral model kullanın, ardından işaretlenmiş veya belirsiz örnekleri doğrulayıcı referans analizine gönderin. Mevcut kaynaklar, tanımlanmış katkı maddesi karışımlarında umut vadeden hızlı

tarama performansını gösterirken, kalibrasyon standardizasyonunun da bir ihtiyaç olduğunu ortaya koymaktadır.

İşletim modeli, gerçekçi katkı maddesi karışımları, birden fazla menşe ve hasat yılı, düşük seviyeli katkı maddesi kullanımı ve cihazlar arası farklılıklar dikkate alınarak eğitilmeli ve doğrulanmalıdır. Sınıf dengesi, harici test seti tasarımı, tespit limitleri ve belirsizlik dikkate alınmadan tek bir başlık doğruluk oranı bildirmekten kaçınılmalıdır.

3. KANIT EKSİKLİKLERİ VE UYGULAMA ÖNCELİKLERİ

Dış doğrulama ve aktarılabilirlik. Bildirilen model performansı hedefe göre değişiklik göstermektedir: ANN simülatörünün UV emilim tahminleri diğer çıktıların çoğundan daha zayıftı ve kompakt NIR sahtecilik çalışması standartlaştırılmış kalibrasyon modelleri gerektirmektedir. Geniş çaplı kullanıma hazır olduğunu iddia etmeden önce, değirmenler, çeşitler, mevsimler, aletler ve operatörler genelinde bağımsız testler şarttır.

Gerçek veriler ve uç nokta uyumu. Modeller, uygun laboratuvar, duyuşal ve resmi sınıflandırma referanslarına göre değerlendirilmelidir. Bir deney setinde yüksek bir sınıflandırma oranı, otomatik olarak eğitilmiş bir panele veya düzenleyici bir teste eşdeğerlik sağlamaz. Kimyayı duyuşal etiketlerle ilişkilendiren mevcut yapay sinir ağı çalışmaları cesaret vericidir, ancak tam operasyonel ikameden ayrı bir görev olmaya devam etmektedir.

Proses fiziğı ve uygulanabilirliğı. Malaksasyon modelleri, gerçek termal yörüngeyi, kalış süresi dağılımını, oksijen koşullarını ve ekipmana özğü ısı transferini temsil etmelidir. Kinetik program çalışması, malaksörün ısı transfer direncinin

ihmal edilmesi durumunda uygulanabilirlik sorununu doğrudan belirtmektedir.

Sahtecilik testi tasarımı. Gelecekteki değerlendirmeler, düşük seviyeli ve karışık sahtecilik, gerçekçi piyasa örnekleri, değişen menşei ve hasat yılları ve dış doğrulama içermelidir. Doğruluk, karar verme açısından önemli seviyelerde duyarlılık, yanlış negatif/yanlış pozitif oranları, kalibrasyon ve belirsizlik ölçütleri ve belirtilen bir doğrulama yolu ile birlikte değerlendirilmelidir. İncelenen kanıtlar, tanımlanmış örnek setlerinde yüksek performans göstermektedir, ancak evrensel güvenilirlik göstermemektedir.

Ekonomi ve uygulama. Yatırım gerekçelerinde, laboratuvar gecikmelerinden, israftan, kalite düşüşlerinden ve enerji veya verimlilik etkilerinden kaynaklanan zararların, sensör, kalibrasyon, bakım ve operatör eğitimi maliyetlerine karşı niceliksel olarak değerlendirilmesi gerekmektedir. Mevcut zeytin sektörü incelemeleri, maliyet ve veri birlikte çalışabilirliğini benimseme kısıtlamaları olarak tanımlamaktadır; burada derlenen literatür, uyumlu bir fabrika düzeyinde maliyet-etkinlik değerlendirmesi sunmamaktadır.

4. ÇÖZÜM

Kanıtlar, pratik bir Gıda 4.0 yol haritasını destekliyor: yoğurma işlemini sensörleştirmek, süreç ve kalite sonuçlarını tahmin etmek için NIR/kemometrik ve yapay sinir ağı (YSA) modelleri kullanmak, kinetik ve ekipman farkındalıklı modellerle kararları sınırlandırmak ve hızlı bir tarama katmanı olarak spektral doğrulamayı uygulamak. Endüstriyel SCADA gösterimleri ve çoklu çıktı YSA çalışmaları güvenilir yapı taşları oluşturuyor; ancak henüz evrensel, tamamen otonom bir çalışma sağlamıyorlar. Karar açısından kritik bir sonraki adım, model tahminlerini ve kontrol eylemlerini laboratuvar ve duysal

sonuçlarla ilişkilendirirken, bağımsız örneklerde kalibrasyon kayması, ekipman varyasyonu ve sahtecilik performansını test eden, çok bölgeli, geleceğe yönelik doğrulamadır.

KAYNAKÇA

- Armenta, S., Moros, J., Garrigues, S., & Guardia, M. D. L. (2010). The Use of Near-Infrared Spectrometry in the Olive Oil Industry. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 50(6), 567–582. <https://doi.org/10.1080/10408390802606790>
- Berrueta, L. A., Alonso-Salces, R. M., and Heberger, K. (2007) Supervised pattern recognition in food analysis. *J. Chromatogr. A* 1158:196–214.
- Bosque-Sendra, J. M., Cuadros-Rodríguez, L., Ruiz-Samblas, C., and de la Mata, A. P. (2012) Combining chromatography and chemometrics for the characterization and authentication of fats and oils from triacylglycerol compositional data—A review. *Anal. Chim. Acta.* 724:1–11.
- Chalmers, J. M, and Griffiths, P. R (2007) Sampling techniques and fiber-optic probes. In *Applications of vibrational spectroscopy in pharmaceutical research and development* Pivonka, D.E., Chalmers, J.M., Griffiths, P.R., Eds., John Wiley & Sons, Chichester, pp. 19–49.
- Funes E, Allouche Y, Beltrán G, Aguliera MP, Jiménez A. A predictive artificial neural network model as a simulator of the extra virgin olive oil elaboration process. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*. 2017;25(4):278-285. doi:10.1177/0967033517725639
- Gendrin, C., Roggo, Y., and Collet, C. (2008) Pharmaceutical applications of vibrational chemical imaging and chemometrics: A review. *J. Pharm. Biomed. Anal.* 48:533–553.

- Gonzalez, A. G. (2007) Use and misuse of supervised pattern recognition methods for interpreting compositional data. *J. Chromatogr. A* 1158:215–225.
- Hannah, R. W. (2002) Standard sampling techniques for infrared spectroscopy. In *Handbook of vibrational spectroscopy* Chalmers, J.M., Griffiths, P.R., Eds., vol. 2, John Wiley & Sons, London, pp. 933–952.
- John C. Cancilla, Selina C. Wang, Pablo Díaz-Rodríguez, Gemma Matute, John D. Cancilla, Dan Flynn, José S. Torrecilla (2014) ; Linking Chemical Parameters to Sensory Panel Results through Neural Networks To Distinguish Olive Oil Quality. *J. Agric. Food Chem.*; 62 (44): 10661–10665. <https://doi.org/10.1021/jf503482h>
- Karoui, R., Downey, G., and Blecker, C. (2010) Mid-infrared spectroscopy coupled with chemometrics: A tool for the analysis of intact food systems and the exploration of their molecular structure; Quality relationships; A review. *Chem. Rev.* 110:6144–6168.
- Luypaert, J., Massart, D. L., and Van der Heyden, Y. (2007) Near-infrared spectroscopy applications in pharmaceutical analysis. *Talanta* 72:865–883.
- Miller, J. N., and Miller, J. C. (2005) *Statistics and chemometrics for analytical chemistry*. Pearson Education, Prentice Hall, New York.
- Norris, K., Barnes, R., Moore, J., and Shenk, J. (1976) Predicting forage quality by infrared reflectance spectroscopy. *J. Anim. Sci.* 43:889–897.
- Raman, C. V., and Krishnan, K. S. (1928) A new type of secondary radiation. *Nature* 121:501502.
- Reich, G. (2002) *Potentialer einsatz von attenuated total reflection-infrarot-und nah-infrarotbildgebungsverfahren*

in der qualitatssicherung fester arzneiformen. Pharm. Ind. 64:870–874.

Rinnan, A., van den Berg, F., and Engelsen, S. B. (2009) Review of the most common pre-processing techniques for near-infrared spectra. Trends Anal. Chem. 28:1201–1222.

Smolinska, A., Blanchet, L., Buydens, L. M., and Wijmenga, S. S. (2012) NMR and pattern recognition methods in metabolomics:from data acquisition to biomarker discovery: A review. Anal. Chim. Acta. 750:82–97.

Vallone, M.; Aiello, G.; Bono, F.; De Pasquale, C.; Presti, G.; Catania, P. An Innovative Malaxer Equipped with SCADA Platform for Improving Extra Virgin Olive Oil Quality. Sensors 2022, 22, 2289. <https://doi.org/10.3390/s22062289>

GIDA BİLİMLERİ VE MÜHENDİSLİĞİ
ALANINDA GÜNCEL KONULAR VE
AKADEMİK DEĞERLENDİRMELER

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